



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**JUHA VESTERINEN**  
**RAKENTEIDEN SUOJAUS LÄMPÖSÄTEILYLTÄ**  
**ÄÄRIOLOSUHTEISSA TERÄSTEOLLISUUDESSA**  
**YLEISILLÄ SUOJAUSMENETELMILLÄ**

Diplomityö

Tarkastajat: Professori Ralf Lindberg ja  
diplomi-insinööri Pentti Haimakainen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Rakennetun ympäristön tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 5.12.2012

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**VESTERINEN, JUHA:** Rakenteiden suojaus lämpösäteilyltä ääriolosuhteissa terästeollisuudessa yleisillä suojausmenetelmillä

Diplomityö, 91 sivua

Joulukuu 2012

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Professori Ralf Lindberg ja diplomi-insinööri Pentti Haimakainen

Avainsanat: Rakenne, suojaus, suojausmenetelmä, terästeollisuus, kuumuus, lämpörasitus, lämpösäteily

Tutkimus laadittiin suunnitteluohjeen pohjaksi. Tutkimuksessa esitellään tietoja, joita tarvitaan kuumiin terästeollisuuden käyttöolosuhteisiin sijoittuvien rakenteiden ja rakenteita suojaavien menetelmien suunnitteluun. Tutkimuksen pohjalta laadittavan suunnitteluohjeen avulla rakenteet saadaan suunniteltua kestävämmän paremmin terästeollisuuden käyttöolosuhteita. Rakenteet kuumenevat terästehtaissa, joissa prosessit lähettävät voimakasta lämpösäteilyä ympäristöönsä. Terästeollisuuteen sijoittuvien rakenteiden suunnittelussa on huomioitava myös mekaaniset ja kemialliset rasitukset.

Tutkimuksessa tarkoituksena oli myös arvioida FDS-lämpösimulointiohjelmiston tarkkuutta ja soveltuvuutta betonirakenteiden pintalämpötilojen sekä lämpösäteilyn tehon simuloinnissa. Tutkimuksessa ohjelmistolla tehdyt lämpösäteilyn tehon laskentatulokset vastasivat todellisia mittaustuloksia noin 25 %:n tarkkuudella. Pintalämpötilojen laskentatulokset vastasivat todellisia mittaustuloksia parhaimmillaan noin 19 %:n tarkkuudella.

Tutkimuksessa kuvaillaan kuumia terästeollisuuden prosesseja ja lämpöolosuhteita terässulatoissa ja kuumavalssaamoissa. Tutkimuksessa on hyödynnetty Rautaruukin Raahan sekä Outokummun Tornion terästehtaiden terässulattojen ja kuumavalssaamojen lämpöolosuhdetietoja. Kuumuudesta aiheutuvia haittoja voivat olla betonirakenteiden halkeilu, rapautuminen ja viruminen, teräsrakenteiden väsyminen, viruminen ja muotojen muuttuminen sekä muurauksien ja massauksien mureneminen.

Tutkimuksessa kuvaillaan kuumiin käyttöolosuhteisiin soveltuvien rakennusainesten sekä Portland-sementtibetonin tärkeimpiä fysikaalisia lämpöominaisuuksia, joita tarvitaan rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa. Tutkimuksessa on käsitelty yleisiä kuumuudensuojausmenetelmiä. Näitä ovat mekaaniset kuumuudensuojausmenetelmät, lämmönlähteen koteloiminen ja betonipeitteen paksuuden kasvattaminen teräsbetonirakenteissa. Myös rakenteen sijoittelulla voidaan vaikuttaa rakenteen lämpötilaan.

Ruostumattoman teräslevyn on terästeollisuudessa huomattu toimivan hyvänä lämpösäteilyn suojana. Tätä suojausominaisuutta on tässä tutkimuksessa tarkasteltu tarkemmin mittauksilla ja FDS-ohjelmistolla laadituilla lämpösimulaatioilla. Ruostumaton teräslevy on myös mittausten ja mallinnusten mukaan erinomainen lämpösäteilyn suoja.

Tutkimus perustuu kirjallisuuteen, tutkimusraportteihin, haastatteluihin, mittaustuloksiin sekä ohjelmistopohjaisiin lämpösimulaatioihin.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**VESTERINEN, JUHA:** Protecting structures from thermal radiation in extreme conditions in steel industry using common protection methods

Master of Science Thesis, 91 pages

December 2012

Major: Structural engineering

Examiners: Professor Ralf Lindberg and Pentti Haimakainen, M.Sc. (Tech.)

Keywords: Structure, protection, protection method, steel industry, heat, thermal load, thermal radiation

The study was prepared to a basis for a design guide. The study produces information which is needed for designing structures in hot service conditions of steel industry and for designing protection methods for structures. The structures will withstand better service conditions in steel industry by means of the design guide based on the study. The structures heat up in steel mills where processes emit intensive thermal radiation. Also, it has to be taken into account mechanical and chemical stresses in structural design in steel industry.

Another purpose of the study was to measure how accurate Fire Dynamics Simulator (FDS) program is for simulating concrete structures' surface temperatures and heat flux. The simulated heat flux results deviated around 12 - 25 % from the measured results. The closest results of the simulated concrete structure's surface temperatures deviated around 19 % from the measured values.

The study describes thermal processes and heat conditions in steel smelting plants and hot rolling mills. Information has been collected from smelting plants and hot rolling mills of Rautaruukki steel mill in Raahé and Outokumpu steel mill in Tornio. Heat might cause cracking, disintegration, creeping, fatiguing, transformation and crumbling to the various construction materials concrete, steel, bricks and coating structures.

It has been described the most relevant physical thermal properties of Portland cement concrete and construction materials that are suitable for hot conditions. Those properties are needed in structural design. Common heat protection methods are presented in the study. These are mechanical heat protection methods, encasing the heat source and increasing cover thickness in reinforced concrete structures. Also the placement of a structure will affect on the structure's temperature.

Stainless steel plate has been noticed to be a good protection method against thermal radiation in steel industry. This protective property has been examined more detailed in the study by making measurements and temperature simulations using the FDS program. Also measurements and simulations indicate that stainless steel plate protects very well against thermal radiation.

Information for the study has been obtained from literature, studies and making interviews, measurements and simulations using FDS software.

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on laadittu diplomityönä Pöyry Finland Oy:lle Kuopion toimistossa. Diplomityön aihe on annettu Oulun toimistosta, josta käsin diplomityötä on myös ohjattu. Haluan kiittää ohjaajaani Risto Jyrkkää, esimiestäni Panu Kangasniemeä sekä työn valvojaa professori Ralf Lindbergiä mahdollisuudesta tehdä tämä työ. Suuri kiitos kuuluu myös Pentti Haimakaiselle, joka on ollut erittäin aktiivisesti ohjauksessa mukana sekä antanut minulle suuren määrän arvokasta tietoa tutkimuksen aihepiiristä.

Tutkimuksessa on tehty yhteistyötä Rautaruukin Raahen sekä Outokummun Tornion terästehtaiden kanssa. Haluan kiittää Rautaruukin yhteyshenkilöä Ville Lahtista sekä Outokummun yhteyshenkilöitä Aki Puskaa ja Jorma Päätaloa työpanoksesta, jonka tutkimuksessa mukana oleminen vaati. Kiitos Aki Puskalle ja Outokummun terästehtaan sulaton henkilöstölle mahdollisuudesta suorittaa mittauksia tehtaalla sekä tehtaalla suoritettujen mittausjärjestelyjen hoitamisesta.

Haluan kiittää myös Tampereen teknillisen yliopiston rakennetekniikan laitosta mittauslaitteiston lainaamisesta sekä Martti Peltomäkeä suuresta avusta mittauksen suorittamisessa. Kiitos myös Pöyryllä työskentelevälle Elina Pajulalle työpanoksesta lämpösimulaatioiden tekemisessä sekä Jaakko Haaparannalle oikoluvusta.

Erityiskiitokset kuuluvat kihlatulleni Tiinalle ja Leevi-pojalleni, jotka ovat tukenet minua tutkimuksen tekemisen aikana.

Kuopiossa 16.1.2013

Juha Vesterinen

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta, tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite .....	1
1.2	Tutkimuksen rakenne .....	2
1.3	Tutkimuksen rajausta .....	2
2	Taustateoria .....	4
2.1	Lämmön siirtymismuodot .....	4
2.1.1	Lämmön säteileminen .....	4
2.1.2	Lämmön johtuminen .....	10
2.1.3	Konvektio .....	11
2.2	Materiaalien fysikaaliset lämpöominaisuudet .....	12
2.2.1	Portland-sementtibetoni .....	12
2.2.2	Kuumuutta kestävä betoni .....	17
2.2.3	Rakenneteräs .....	22
2.2.4	Ruostumaton teräs .....	27
2.2.5	Betoniteräs .....	32
2.2.6	Mineraalivilla .....	32
2.3	Viruminen .....	35
2.4	Väsyminen .....	37
2.5	Lämpötilan vaikutus rakenteiden muodonmuutokseen ja jännitykseen .....	38
3	Tarkasteltavat case-kohteet .....	39
3.1	Teräksen valmistus Rautaruukin Raahen terästehtaalla .....	39
3.2	Teräksen valmistus Outokummun Tornion terästehtaalla .....	41
3.3	Lämpöolosuhteet case-kohteissa .....	45
3.3.1	Lämpöolosuhteet Rautaruukin Raahen terästehtaalla .....	45
3.3.2	Lämpöolosuhteet Outokummun Tornion terästehtaalla .....	51
3.4	Kuumuuden vaikutus case-kohteiden rakenteisiin .....	57
4	Kuumuudensuojausmenetelmät .....	58
4.1	Mekaaniset kuumuudensuojausmenetelmät .....	58
4.1.1	Tulenkestävä massa .....	58
4.1.2	Tulenkestävät tiilet .....	61
4.1.3	Teräslevy .....	62
4.1.4	Teräsverkko .....	63
4.2	Betonipeitteen paksuuden kasvattaminen .....	64
4.3	Rakenteen sijoittaminen .....	64
4.4	Lämmönlähteen koteloiminen .....	64
4.5	Kuumuudensuojausratkaisujen ideointia .....	64
4.5.1	Rakenteen pinta lämpötilassa 0–100 °C .....	65
4.5.2	Rakenteen pinta lämpötilassa 100–200 °C .....	65
4.5.3	Rakenteen pinta lämpötilassa 200–300 °C .....	65
4.5.4	Rakenteen pinta lämpötilassa 300–400 °C .....	65

4.5.5	Rakenteen pinta lämpötilassa 400–600 °C .....	66
4.5.6	Rakenteen pinta lämpötilassa 600–700 °C .....	66
4.5.7	Rakenteen pinta yli 700 °C:n lämpötilassa .....	67
5	Mittaukset.....	68
5.1	Tutkittavat kohteet .....	68
5.1.1	Betoniseinä.....	68
5.1.2	Teräspalkki.....	69
5.2	Lämmönlähde.....	70
5.3	Mittausperiaatteet ja mittauslaitteet .....	71
5.3.1	Mittausvirhe .....	74
5.4	Mittaustulokset ja niiden tarkastelu .....	75
5.4.1	Lämpösäteilyn teho lähietäisyydellä betoniseinästä .....	75
5.4.2	Ilman lämpötila lähietäisyydellä suojaamattomasta betoniseinästä... 76	
5.4.3	Lämpötila suojaamattomassa betoniseinässä.....	77
5.4.4	Lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa betoniseinässä . 78	
5.4.5	Lämpötila suojaamattomassa teräspalkissa .....	80
5.4.6	Lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa teräspalkissa.... 81	
6	Mallinnukset.....	83
6.1	Yleistietoa mallinnusohjelmistosta .....	83
6.2	Mallinnusperiaatteet.....	83
6.3	Simulointitulokset ja niiden tarkastelu.....	85
6.3.1	Lämpösäteilyn teho betoniseinän pinnassa.....	85
6.3.2	Lämpötila suojaamattomassa betoniseinässä.....	86
6.3.3	Lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa betoniseinässä . 87	
6.4	Päätelmät ja jatkotoimenpiteet .....	88
	Lähteet.....	90

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Aihio	Valetun, valssatun, taotun tai muulla tavoin valmistetun jatkovalmistukseen tarkoitetun kappaleen yleisnimitys [1].
Aluminaattisementti	Sementtityyppi, joka sisältää pääosin alumiinioksidaa (40–45 %), kalsiumoksidaa (30–35 %) ja rautaoksidaa (noin 10 %).
Austeniittinen teräs	Teräslaatu, jonka mikrorakenne on austeniittinen. Sisältää vähintään 17 % kromia ja 7 % nikkeliä. [2]
Betoniteräs	Terästanko, jota käytetään betonirakenteen vahvisteena.
Ferrokromi	Ruostumattoman teräksen tärkein seosaine, jonka tyypillinen koostumus on: Cr 53 %, Fe 37 %, C 7 % ja Si 3 % [1].
Kalkki	Arkikielinen nimitys kalsiumoksidille.
Kela	Rullattu teräsnauhatuote, jossa nauhan leveys on vähintään 600 mm. Termiä käytetään Rautaruukin tuotteista.
Korkea lämpötila	Tässä tutkimuksessa korkealla lämpötilalla tarkoitetaan yli 150 °C:n lämpötilaa.
Kuumuus	Tässä tutkimuksessa kuumuudella tarkoitetaan sellaista lämpörasitusta, joka nostaa rakenteen pinnan lämpötilan yli 200 °C:seen.
Lämpö	Tässä tutkimuksessa lämmöllä tarkoitetaan sellaista lämpörasitusta, joka nostaa rakenteen pinnan lämpötilan 100–200 °C välille.
Lämpörasitus	Tässä tutkimuksessa lämpörasituksella tarkoitetaan yli 100 °C:n lämpötilasta rakenteelle aiheutuvaa rasitusta.
Masuunikuonajauhe	Valmistetaan jauhamalla granuloitua masuunikuonaa. Granulointua kuonaa saadaan, kun raakaraudan valmistuksen yhteydessä syntyvä emäksinen sulate jäähdytetään nopeasti vesisuihkujen avulla ja kuonasta tulee lasimaista.
Masuunikuonasementti	Sementtityyppi, joka perustuu masuunikuonajauheeseen.
Panos	Teräksen tuotantoprosessissa kerrallaan käsiteltävä sula massa, joka koostuu pääosin sulasta teräksestä tai raudasta.
Portland-sementti	Sementtityyppi, joka sisältää pääosin kalsiumoksidaa, piioksidia ja alumiinioksidaa.
Rakenneteräs	Teräslaatu, jossa hiilipitoisuus on pienempi kuin 0,3 %.
Rulla	Rullattu teräsnauhatuote, jossa nauhan leveys on vähintään 600 mm. Termiä käytetään Outokummun tuotteista.
Rullarata	Vaakatasossa oleva apulaite valssaamossa tai sulatossa, jolla kuumaa aihioita kuljetetaan tuotantoprosessissa [1].
Ruostumaton teräs	Runsasseosteinen teräs, joka kestää korroosiota. Sisältää vähintään 10,5 % kromia ja usein myös nikkeliä. [1]
Samotti	Poltettu tulenkestävä savi.

Senkka	Suuri pyöreäpohjainen, kartiomainen astia, valusanko, jossa käsitellään ja jolla siirretään sulaa metallia [1].
Silika	Arkikielinen nimitys piidioksidille.
Teräs	Raudan ja hiilen seos, jossa hiilipitoisuus on pienempi kuin 2,11 % [1].
Viruminen	Vakiokuormituksen tai -jännityksen alaisena tapahtuvaa ajasta ja lämpötilasta riippuvaa pysyvää eli plastista muodonmuutosta [3].
Väsyminen	Kun rakennetta kuormitetaan vaihtelevalla, sykulisellä kuormituksella, sen materiaaliin syntyy lujuutta laskevia väsymisvaurioita, jolloin puhutaan rakenteen väsymisestä.



# 1 JOHDANTO

Rakenteiden mitoitus koostuu mitoituksesta murtorajatilassa sekä käyttörajatilassa. Murtorajatilamitoituksessa rakenteet suunnitellaan kestäväksi niihin kohdistuvat rasitukset murtumatta. Käyttörajatilamitoituksessa rakenteet suunnitellaan siten, että niiden muodonmuutos tai liike ei aiheuta vahinkoa pintamateriaaleille, katoille, lattioille, kevyille väliseinille tai pinnoitteille. Käyttörajatilamitoituksessa rakenteen muodonmuutos tai liike ei myöskään saa aiheuttaa haittaa rakenteen tai rakennuksen toiminta- ja ulkonäkövaatimusten kannalta. Teollisuusrakennusten käyttörajatilamitoituksessa rakenteet suunnitellaan siten, että rakenteet toimivat oikein häiritsemättä rakennuksessa tapahtuvaa teollista toimintaa. Esimerkiksi nosturipalkit eivät saa taipumalla häiritä nostureiden käyttöä ja valvomoiden ikkunalasit eivät saa sumentua ja vaikeuttaa työntekijöiden työskentelyä.

Rakenteen lämpötila vaikuttaa sen lujuusominaisuuksiin. Kun teräsrakenne kuumenee, se laajenee ja sen lujuusominaisuudet heikkenevät. Kun teräsrakenne jäähtyy takaisin lämpötilaan, joka sillä oli ennen kuumenemista, sen lujuusominaisuudet pääosin palautuvat, jos teräksen lämpötila ei ole kuumenemisen aikana ylittänyt arvoa 735 °C. Toistuva korkea lämpörasitus lyhentää rakenteen käyttöikää.

Myös betonirakenne laajenee kuumentuessaan. Lisäksi kuumeneminen aiheuttaa betonille rapautumista ja halkeilua, mikä heikentää betonirakenteen lujuusominaisuuksia. Betonirakenteen lujuusominaisuudet eivät palaudu kaikilta osin sen jäähtyessä, sillä halkeilu ja rapautuminen jättävät betonirakenteeseen pysyviä vaurioita.

Lämpörasituksen aiheuttama rakenteen lujuuden tilapäinen tai pysyvä heikentyminen vaikuttaa rakenteiden mitoitukseen niin murtorajatilassa kuin käyttörajatilassa. Jotta kuumuuden vaikutusta rakenteen toimivuuteen saadaan rajoitettua, rakenne pitää joko suojata kuumuudelta tai rakenteessa pitää käyttää kuumuutta sietävää materiaalia.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan, minkälaisilla erilaisilla kuumuudensuojausmenetelmillä rakenteita voidaan suojata terästeollisuudessa lämpösäteilyltä. Työssä esitellään yleisesti käytössä olevia kuumuudensuojausmenetelmiä sekä tarkastellaan, minkälaisia rakennusmateriaaleja voidaan käyttää kuumiin käyttöolosuhteisiin sijoittuvissa rakenteissa.

## 1.1 Tutkimuksen tausta, tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite

Diplomityönä tehtävän tutkimuksen tilaaja on Pöyry Finland Oy. Yrityksen yhtenä toimialana on teollisuuden rakennesuunnittelu, ja sen asiakkaina on useita terästeollisuuden yrityksiä.

Suunniteltavat rakenteet voivat sijaita kuumissa käyttöolosuhteissa terästehtaisissa. Jos lämpörasituksia ei huomioida rakenteiden suunnittelussa, rakenteiden käyttöikä

ei välttämättä ole suunnitellun pituinen. Mikäli lämpörasitukset ovat rajuja, ja rasituksia ei ole rakenteiden suunnittelussa huomioitu, rakenteiden voi käyttöikä olla vain muutamia vuosia. Terästeollisuuden kuumiin olosuhteisiin sijoittuvien rakenteiden toistuvasta korjaamisesta koituu suuria kustannuksia.

Tämä tutkimus laadittiin suunnitteluohjeen pohjaksi. Tutkimuksessa esitellään tietoja, joita tarvitaan kuumiin terästeollisuuden käyttöolosuhteisiin sijoittuvien rakenteiden ja rakenteita suojaavien menetelmien suunnitteluun. Tutkimuksen pohjalta laadittavan suunnitteluohjeen avulla rakennesuunnittelijat pystyvät valitsemaan rakenteen materiaalin tai rakenteen suojausmenetelmän lämpörasituksia kestäväksi. Oikeilla materiaalivalinnoilla ja kuumuudensuojausmenetelmillä suunnittelijoiden suunnittelemat rakenteet kestävät käytössä määritellyn käyttöiän.

Tutkimuksessa hyödynnettiin Outokummun Tornion ja Rautaruukin Raahen terästehtaiden olosuhdetietoja.

## **1.2 Tutkimuksen rakenne**

Tutkimuksessa selvitettiin ensin, minkälaiset rakenteet ovat kohteissa yleisimmin lämpörasituksille alttiina ja mitä kuumuudensuojausmenetelmiä kohteissa oli käytetty. Kohteet olivat Raahessa sijaitsevan Rautaruukin sekä Torniossa sijaitsevan Outokummun terästehtaiden terässulatot ja kuumavalssaamot. Selvitys suoritettiin 7.–8.5.2012 välisenä aikana käymällä tehtailla paikan päällä katsomassa tuotanto-olosuhteita ja rakenteita sekä haastatteleamalla tehtaiden henkilökuntaa. Tehdaskierroksilla mitattiin rakenteiden lämpötiloja infrapunalämpömittarilla, jolla saatiin karkeaa yleiskuvaa rakenteiden lämpötilojen vaihtelusta ja siitä, mitä rakenteita kannattaisi myöhemmin mitata tarkemmalla mittaustilalaitteistolla.

Seuraavaksi 13.–20.6.2012 rajattiin, minkälaisten rakenteiden lämpöolosuhteita ja minkälaisia kuumuudensuojausmenetelmiä työssä tarkasteltaisiin yhdessä diplomityön ohjaajan DI Risto Jyrkän, diplomityön valvojan prof. Ralf Lindbergin sekä DI Pentti Haimakaisen kanssa. Tämän jälkeen suunniteltiin, kuinka tutkimuksessa tarvittavat lämpötilatiedot mitattaisiin. Myös mittausten kohteena olleet rakenteet valittiin.

Mittaukset suoritettiin 21.11.2012. Mittausten jälkeen lämpötilatiedot analysoitiin, ja ne sisällytettiin tutkimukseen. Mitattavista kohteista laadittiin myös erilliset lämpömallinnuslaskelmat FDS-ohjelmistolla. Mittaustulosten avulla tutkimuksessa arvioitiin lämpömallinnustulosten luotettavuutta.

## **1.3 Tutkimuksen rajaus**

Terästeollisuudessa vallitsevien lämpöolosuhteiden tarkastelussa on hyödynnetty Rautaruukin Raahen sekä Outokummun Tornion terästehtaiden terässulattojen ja kuumavalssaamojen lämpöolosuhdetietoja. Lämpöolosuhteiden tarkastelussa on keskitytty lämpösäteilyyn.

Tutkimuksessa rakennusaineista tarkasteltavana ovat Portland-sementtibetoni, rakenneteräs, betoniteräs, ruostumaton teräs, kuumuutta kestävä betoni sekä kuumuutta kestävät mineraalivillaeristeet. Tutkimuksessa on tarkasteltu rakennusaineiden lämpöfysikaalisia ominaisuuksia.

Tarkkoja pintalämpömittauksia on tehty teräs- ja betonirakenteesta. Myös betonirakenteeseen kohdistuvaa säteilytehoa on tutkimuksessa mitattu. Rakenteet sijaitsevat Outokummun Tornion terästehtaan terässulaton jatkuvavalukone 1:n rullaradan vieressä.

Lämpösäteilyltä suojaavia kuumuudensuojausmenetelmiä on käsitelty yleisellä tasolla. Ruostumatonta teräslevyä lämpösäteilysuojana teräs- ja betonirakenteessa on käsitelty tarkemmin. Sen suojausvaikutusta on tarkasteltu pintalämpötilojen mittauksilla sekä FDS-lämpösimulointiohjelmistolla. Simulointituloksia on verrattu mittaustuloksiin, ja vertailun pohjalta on arvioitu FDS-ohjelmiston luotettavuutta betonirakenteiden pintalämpötilojen sekä lämpösäteilytehon simulointiin.

## 2 TAUSTATEORIA

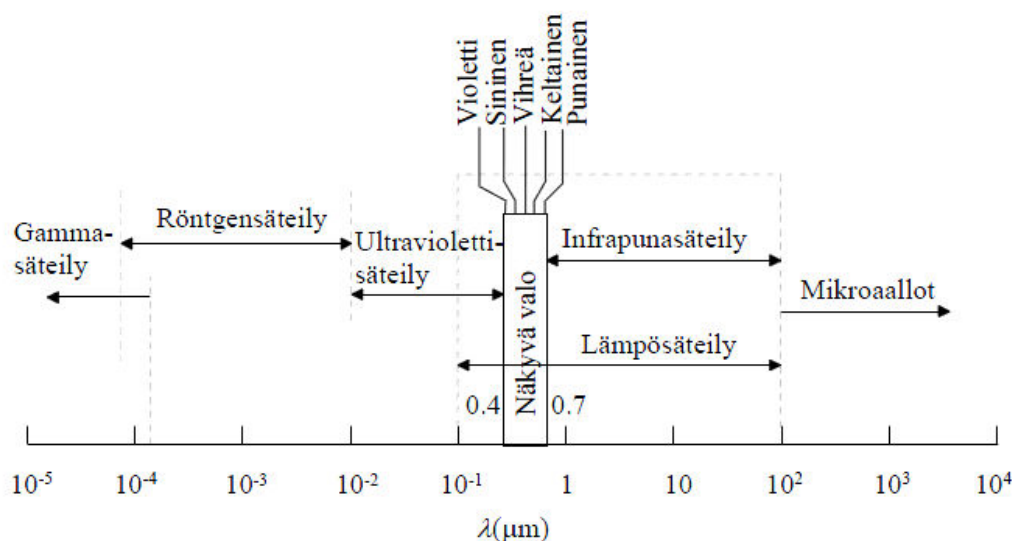
Tässä luvussa on kerrottu lämmön siirtymismuodoista, materiaalien fysikaalisista lämpöominaisuuksista, virumisesta, väsymisestä sekä lämpötilan vaikutuksesta rakenteiden muodonmuutoksiin ja jännityksiin. Kappaleisiin on koottu sellaisia tietoja, joista on hyötyä kuumiin olosuhteisiin sijoittuvien rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa.

### 2.1 Lämmön siirtymismuodot

Lämmönsiirto jaetaan eri osa-alueisiin, joiden käsittely poikkeaa huomattavasti toisistaan. Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla. Lämmönsiirtymismuodot ovat säteily, johtuminen ja konvektio. [4]

#### 2.1.1 Lämmön säteileminen

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota jokainen kappale lähettää pelkästään lämpötilansa perusteella. Lämpösäteilyksi kutsutaan sitä osaa sähkömagneettisesta säteilystä, jonka aallonpituus on alueella 0,3–50  $\mu\text{m}$ . [5] Sähkömagneettisen säteilyn spektri on osoitettu kuvassa 2.1.



**Kuva 2.1.** Sähkömagneettisen säteilyn spektri [5].

Säteilylämmönsiirron suunta on aina kuumemmasta kylmempään. Kun säteily kohtaa pinnan, osa siitä absorboituu, osa heijastuu takaisin ja loput säteilystä menee pinnan

läpi. Toisin kuin johtumis- ja konvektiolämmönsiirron tapauksessa ei säteilylämmönsiirto vaadi erillistä väliainetta. [5]

Jokainen kappale, joka on absoluuttista nollapistettä korkeammassa lämpötilassa, lähettää lämpösäteilyä ympäristöönsä laajalla kaistalla aallonpituuksia. Kappaleen pinnasta lähtevän säteilyenergian määrä tietyllä aallonpituudella riippuu kappaleen materiaaliominaisuuksista, pinnan ominaisuuksista sekä pinnan lämpötilasta. [5]

Siirtyvään energiamäärään vaikuttaa voimakkaasti pintojen lämpötilaero ja pintojen kyky lähettää (emittoida) ja vastaanottaa (absorboida) lämpösäteilyä. Tavanomaiset rakennusmateriaalit ottavat lämpösäteilystä vastaan keskimäärin 90 %, loput 10 % heijastuu takaisin. Musta pinta vastaanottaa lähes 100 % lämpösäteilyä, kun taas kiiltävä alumiini vain noin 3 %. [6]

Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tarkemmin teoriaa kahden pinnan välisen energiamäärän siirtymisen laskemista varten.

#### 2.1.1.1 Musta kappale

Musta kappale on määritelty siten, että se on säteilyn kannalta täydellinen säteilijä ja absorboija. Musta kappale absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn riippumatta säteilyn aallonpituudesta tai tulosuunnasta. Sen lisäksi musta kappale säteilee lämpöä tasaisesti joka suuntaan. [5]

Mustan kappaleen lähettämä säteilyteho pinta-alaa kohden on kokeellisesti määritetty, ja se ilmaistaan kaavalla:

$$E_b = \sigma T^4, \quad (2.1)$$

missä  $\sigma$  on Stefan-Bolzmännin vakio  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ,  
 $T$  on pinnan lämpötila Kelvineinä.

Yhtälö on paremmin tunnettu Stefan-Bolzmännin lakina ja  $E_b$ :tä kutsutaan mustan kappaleen säteilemisvoimakkuudeksi. Pinnat, jotka on maalattu mattamustalla maalilla, ovat säteilyominaisuuksiltaan lähellä ideaalista mustaa kappaletta. [5]

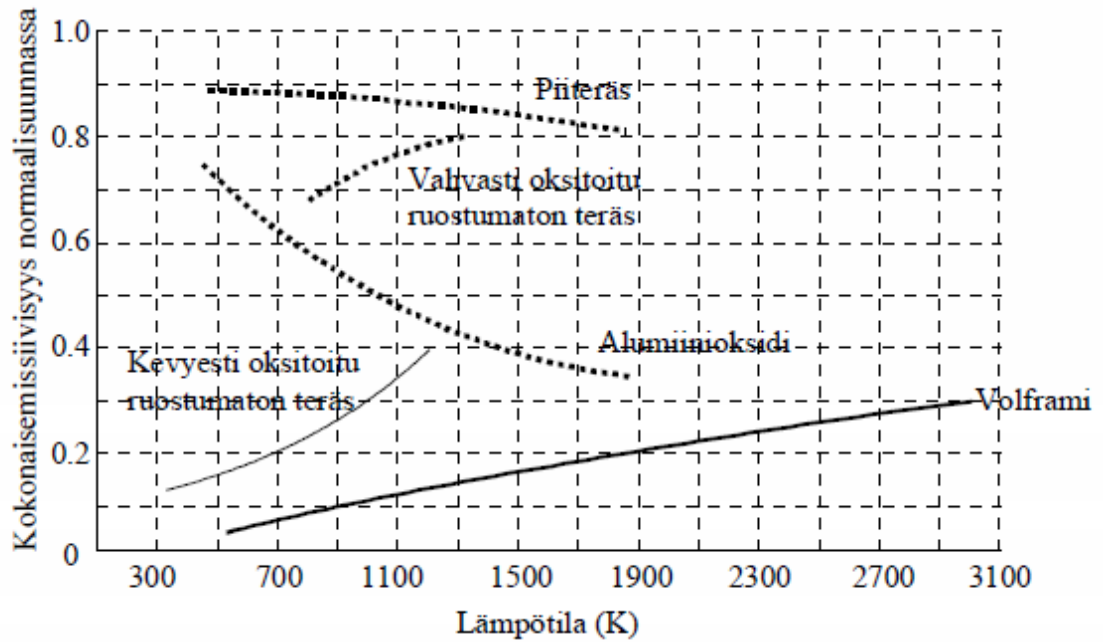
#### 2.1.1.2 Emissiivisyys $\epsilon$

Pinnan emissiivisyys määritellään pinnan lähettämän säteilyn ja samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen lähettämän säteilyn osamääränä. Emissiivisyyttä merkitään symbolilla  $\epsilon$ , ja se on aina välillä  $0 < \epsilon < 1$ . Emissiivisyys kertoo, kuinka lähellä ideaalista mustaa kappaletta tarkasteltava pinta on säteilyominaisuuksiltaan. Mustan kappaleen tapauksessa emissiivisyyden arvo on 1. [5]

Emissiivisyys ei kuitenkaan ole vakio, vaan se vaihtelee pinnan lämpötilan, säteilyn aallonpituuden ja säteilysuunnan funktiona. Siten pinnalle voidaan määritellä useita eri emissiivisyyksiä, kuten emissiivisyys määräsuuntaan tai emissiivisyys tietyllä aallonpituudella. Pinnan kokonaisemissiivisyys  $\epsilon$  on keskimääräinen emissiivisyys kaikkiin eri suuntiin kaikilla mahdollisilla aallonpituuksilla. [5]

Säteilytehon riippuvuus aallonpituudesta ja säteilyn suunnasta tekee säteilylämmönsiirrosta eksaktisti tarkasteltuna hyvin kompleksisen ilmiön. Säteilyä analysoitaessa otetaan yleensä huomioon ainoastaan pinnan normaalin suuntainen säteily, jolloin  $\epsilon \approx \epsilon_n$ . [5]

Metallipintojen emissiivisyys on yleensä pieni. Hyvin kiillotetun kullan tai hopean emissiivisyys voi olla jopa 0,02. Metallipinnalla oleva oksidikerros saattaa kasvattaa pinnan emissiivisyyttä merkittävästi. Eristeiden emissiivisyys on varsin suuri, yleensä yli 0,6. Muutamien metallien emissiivisyyksiä on esitetty kuvassa 2.1. [5]

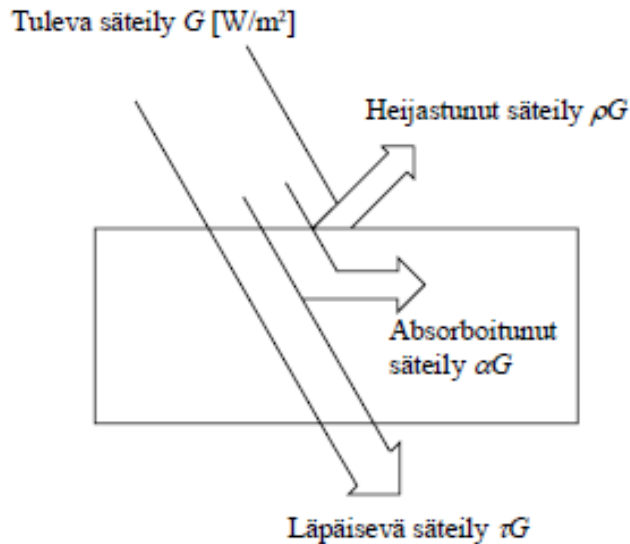


**Kuva 2.2.** Pinnan normaalin suuntaisen emissiivisyyden käyttäytyminen lämpötilan funktiona [5].

### 2.1.1.3 Säteilyn absorptio, heijastuminen ja läpäisy

Kaikki meitä ympäröivä materia lähettää jatkuvasti lämpösäteilyä ympäristöönsä. Kappaleen pintaan pinta-ala- ja aikayksikköä kohti tulevaa säteilyenergiaa kutsutaan irradianssiksi  $G$ . Kun säteily kohtaa pinnan, osa siitä absorboituu, osa heijastuu takaisin ja loput säteilystä menee pinnan läpi. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.3. [5]

Heijastuneen säteilyn suhdetta tulevaan säteilyyn kutsutaan heijastussuhteeksi  $\rho$ . Kappaleen absorboiman säteilyn suhde tulevaan säteilyyn on absorptiosuhde  $\alpha$  ja kappaleen läpäisevän säteilyn suhde tulevaan säteilyyn on läpäisysuhde  $\tau$ . [5]



**Kuva 2.3.** Säteilyn heijastuminen, absorptio ja läpäisy [5].

Käytännön säteilylaskuja voidaan karkeasti laskea käyttämällä Kirchhoffin lakia, jonka mukaan lämpötilassa  $T$  olevan pinnan emissiivisyys on yhtä suuri kuin pintaan tulevan, samassa lämpötilassa olevasta mustasta kappaleesta lähtöisin olevan säteilyn absorptiosuhde, eli

$$\varepsilon(T) = \alpha(T). \quad (2.2)$$

Yhtälö 2.2 on kokeellisesti määritelty, ja sitä tulee käyttää varoen tapauksissa, jolloin säteilyn lähteen ja tarkasteltavan kappaleen lämpötilaero on suuri. [5]

#### 2.1.1.4 Näkyvyyskerroin $F_{ij}$

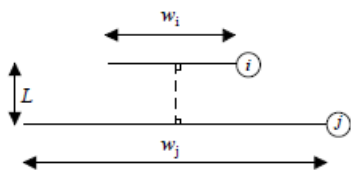
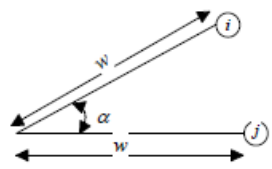
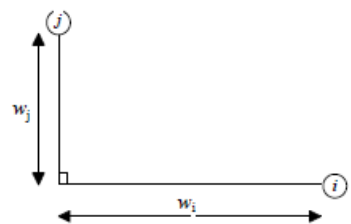
Pintojen välinen säteily riippuu niiden sijainnista toisiinsa nähden, pintojen lämpötilasta sekä säteilevien pintojen säteilyominaisuuksista [5]. Jotta voidaan tarkastella säteilevien pintojen sijainnin vaikutusta niiden väliseen säteilylämmönsiirtoon, pitää määritellä näkyvyyskerroin  $F_{ij}$  [5]. Tämä on puhtaasti geometrinen suure ja siten riippumaton pinnan ominaisuuksista ja lämpötilasta [5]. Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan vain diffuuseja pintoja, joten termi näkyvyyskerroin viittaa diffuusiin näkyvyyskertoiimeen. Pinnan sanotaan olevan diffuusi, mikäli sen säteilyominaisuudet ovat riippumattomat säteilyn suunnasta [5].

Pinnan  $i$  näkyvyyskerrointa pinnan  $j$  suhteen merkitään  $F_{ij}$  ja se on määritelty pinnasta  $i$  lähtevän säteilyn määränä, joka kohtaa pinnan  $j$ . On huomattava, ettei pintaan tulevan säteilyn tarvitse absorboitua siihen. Lisäksi säteilyn heijastumisesta aiheutuvat ilmiöt on jätetty huomioonottamatta näkyvyyskerroimen määrittelyssä. [5]

Näkyvyyskerroin on aina välillä  $[0, 1]$ . Mikäli  $F_{ij} = 0$ , ei pinnat  $i$  ja  $j$  ole suorassa näköyhteydessä toisiinsa eikä pinnasta  $i$  lähtevä säteily kohtaa pintaa  $j$ . Esimerkkinä tästä on kuperan pinnan näkyvyyskerroin itsensä suhteen. Mikäli  $F_{ij} = 1$ , on pinta  $i$  ko-

konaisuudessaan pinnan  $j$  ympäröimä, jolloin kaikki pinnasta  $i$  lähtevä säteily kohtaa pinnan  $j$ . Esimerkkinä voidaan mainita kaksi sisäkkäistä ympyrää, jossa kaikki sisemmästä ympyräpinnasta lähtevä säteily kohtaa ulomman ympyrän sisäpinnan. [5]

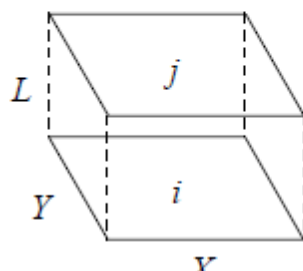
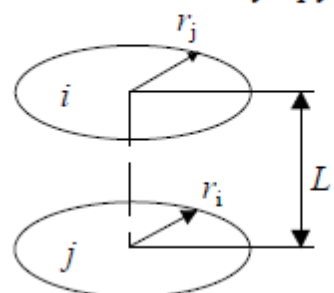
Näkyvyyskertoimen määrittämiseen on laadittu valmiita kaavoja kaksidimensioisiin tapauksiin ja kolmedimensioisiin tapauksiin. Muutamia kaksidimensioisia tapauksia koskevia kaavoja on esitetty kuvassa 2.4.

Geometria	Yhtälö
<p>Toisiinsa nähden rinnakkain olevat levyt</p> 	$F_{ij} = \frac{\left[ (W_i + W_j)^2 + 4 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ (W_j - W_i)^2 + 4 \right]^{\frac{1}{2}}}{2W_i}$ $W_i = w_i / L, W_j = w_j / L$
<p>Toisiinsa nähden kulmssa <math>\alpha</math> olevat yhtä pitkät levyt</p> 	$F_{ij} = 1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$
<p>Toisiinsa nähden suorassa kulmassa olevat levyt</p> 	$F_{ij} = \frac{1 + (w_j/w_i) - \left[ 1 + (w_j/w_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{2}$

**Kuva 2.4** Näkyvyyskertoimien yhtälöitä yleisissä 2D-tapauksissa [5].

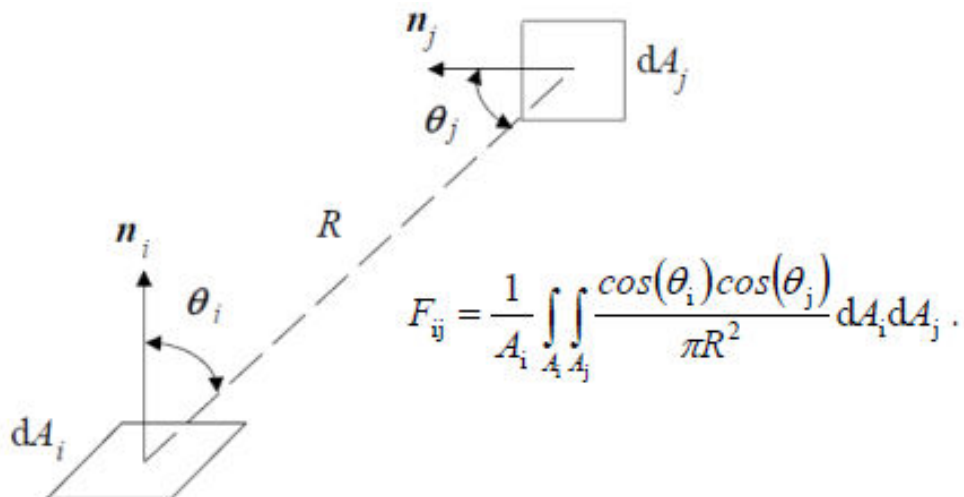
Muutamia kaavoja näkyvyyskertoimen määrittämiseen kolmedimensioisissa tapauksissa on esitetty kuvassa 2.5.



Geometria	Yhtälö
<p>Päällekkäin olevat suorakaiteet</p> 	$\bar{X}=X/L, \bar{Y}=Y/L$ $F_{ij} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[ \frac{(1+\bar{X}^2)(1+\bar{Y}^2)}{1+\bar{X}^2+\bar{Y}^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \bar{X}(1+\bar{Y}^2)^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1+\bar{Y}^2)^{\frac{1}{2}}} \right. \\ \left. + \bar{Y}(1+\bar{X}^2)^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1+\bar{X}^2)^{\frac{1}{2}}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
<p>Päällekkäin olevat ympyrät</p> 	$R_i = r_i / L, R_j = r_j / L \quad S = 1 + \frac{1+R_j^2}{R_i^2}$ $F_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ S - \left[ S^2 - 4 \left( \frac{r_j}{r_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$

**Kuva 2.5** Näkyyyskertoimien yhtälöitä eräissä 3D-tapauksissa [5].

Jos tapaukselle ei löydy sopivaa kaavaa, näkyyyskerroin voidaan laskea integroimalla. Integrointi suoritetaan kappaleiden pinta-alojen yli ja integrointikaavassa tarvitaan kappaleiden keskipisteiden välisen etäisyyden arvoa  $R$  sekä etäisyysuoran ja pintojen normaalien välisiä kulmia  $\theta_i$  ja  $\theta_j$ . Alla on esitetty kuva 2.6 laskennan avuksi.



**Kuva 2.6.** Kahden elementtipinnan välinen säteily. Elementtien keskipisteet on yhdistetty suoralla, jonka pituus on  $R$ . Suora muodostaa kulmat  $\theta_i$  ja  $\theta_j$  pintojen normaalien kanssa.  $R$ ,  $\theta_i$  ja  $\theta_j$  muuttuvat pintojen  $A_i$  ja  $A_j$  toisiinsa nähden olevan suunnan mukaisesti. [5]

### 2.1.1.5 Kappaleiden välinen säteilylämmönsiirto

Kahden kappaleen välinen säteilylämmönsiirto kappaleesta  $i$  kappaleeseen  $j$  saadaan karkeasti laskettua kaavalla

$$q_{ij} = A_i F_{ij} \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_j^4), \quad (2.3)$$

missä	$A_i$	on säteilevän pinnan pinta-ala,
	$F_{ij}$	on kappaleiden $i$ ja $j$ välinen näkyvyyskerroin,
	$\varepsilon_i$	on kappaleen $i$ emissiivisyys,
	$\sigma$	on Stefan-BolzmANNin vakio $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ,
	$T_i$	on kappaleen $i$ pinnan lämpötila Kelvineinä,
	$T_j$	on kappaleen $j$ pinnan lämpötila Kelvineinä.

Kaavaa 2.3 käytettäessä oletetaan pintojen  $i$  ja  $j$  säteilyominaisuuksien olevan riippumattomia säteilyn suunnasta sekä emissiivisyyden  $\varepsilon$  olevan vakio riippumatta säteilyn suunnasta tai aallonpituudesta [5]. Kun kaava kerrotaan pinnan  $j$  absorptiokertoimella  $\alpha_j$ , saadaan kuinka paljon pinnasta  $i$  lähtevästä säteilystä absorboituu pintaan  $j$ . Tällöin kaava tulee muotoon:

$$q_{ij} = A_i F_{ij} \varepsilon_i \alpha_j \sigma (T_i^4 - T_j^4). \quad (2.4)$$

Karkeasti laskettaessa pinnan  $j$  absorptiokertoimenä  $\alpha_j$  voidaan käyttää pinnan  $j$  emissiivisyyttä  $\varepsilon_j$  Kirchhoffin lain, eli yhtälön 2.2 mukaisesti.

### 2.1.2 Lämmön johtuminen

Lämmön johtumista esiintyy kiinteissä aineissa, mutta myös nesteessä ja kaasussa lämpötilaerojen ollessa pieniä [4]. Johtumisessa lämpöenergia siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan päin [6]. Olennaisena tekijänä lämmön siirtymisessä on materiaalin lämmönjohtavuus [6].

Lämmön johtuminen tapahtuu systeemin sisällä tai systeemistä toiseen suoraan molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä ilman aineensiirtoa. Aineen lämmönjohtavuus on fysikaalinen ominaisuus, joka kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuus on yleisesti ottaen lämpötilan ja paikan funktio, mutta usein systeemi ajatellaan homogeeniseksi niin, ettei lämmönjohtavuus riipu paikasta, ja myös pienillä lämpötilaeroilla pidetään lämmönjohtavuutta vakiona. [5]

Aineen lämmönjohtavuutta merkitään symbolilla  $k$  tai  $\lambda$ . Johtumalla siirtyvään lämpöenergiaan vaikuttaa yleisesti myös tarkasteltavan kappaleen pintojen lämpötilat, kappaleen paksuus sekä kappaleen poikkipinta-ala.

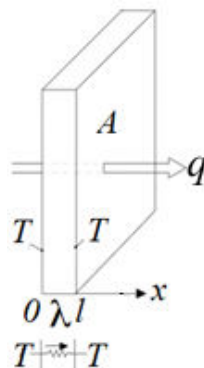
Johtumalla siirtyvän lämpövirran laskemista varten on olemassa laskentakaavoja yksi- kaks- ja kolmidimensioisia tarkastelutilanteita varten. Laskettaessa johtumalla

siirtyvää lämpövirtaa levymäisissä kappaleissa käytetään yksidimensioisen tarkastelutilanteen laskentakaavaa

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{l}, \quad (2.5)$$

missä	q	on kappaleen läpi johtumalla kulkeutuva lämpövirta,
	$\lambda$	on kappaleen lämpötilaa vastaava lämmönjohtavuus,
	$T_1$	on kappaleen pinnan lämpötila pinnassa 1,
	$T_2$	on kappaleen pinnan lämpötila pinnassa 2,
	A	on lämmön johtumissuuntaa vastaan kohtisuorassa oleva kappaleen poikkipinta-ala,
	l	on kappaleen paksuus johtumissuunnassa.

Kaavasta voidaan todeta, että lämmönjohtavuuden kaksinkertaistuessakin myös siirtyvä lämpöenergia kaksinkertaistuu. Mitä suurempi on pintojen välinen lämpötila ero, sitä suurempi on myös johtumalla siirtyvä lämpövirta. Mitä suurempi on kappaleen kohtisuora johtumissuuntaa vastaan olevan poikkipinta-alan ja johtumissuunnassa olevan kappaleen paksuuden suhde, sitä suurempi on myös johtumalla siirtyvä lämpövirta. [6] Yksidimensioista tarkastelutilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.6.



**Kuva 2.6.** Lämmön johtuminen yksidimensioisessa tilanteessa.

### 2.1.3 Konvektio

Konvektio on lämmön siirtoa kaasussa tai nesteessä lämmön aiheuttamien virtausten mukana. Arkikielessä konvektiota kutsutaan myös lämmön kuljettumiseksi. Konvektio aiheutuu lämpötilaerosta, joka aiheuttaa tiheyseroja. Kuuma, harva aine kohoaa painovoimakentässä ylöspäin. Liikkeellepaneva voima on siis noste. Tiheämpi, viilentynyt aine laskeutuu alaspäin. [4]

Konvektiiviseen lämmönsiirtoon liittyy aina nesteen tai kaasun virtaus. Jos virtauksen synnyttää pelkkä lämpötilaero, kyseessä on luonnollinen eli vapaa konvektio. Jos sen saa aikaan esimerkiksi puhallin, puhutaan pakotetusta konvektiosta. [4]

## 2.2 Materiaalien fysikaaliset lämpöominaisuudet

Rakenteiden rasittaminen ei aina tapahdu normaalilämpötilassa. Rakenteet voivat joutua toimimaan arktisissa olosuhteissa, avaruudessa tai korkeissa lämpötiloissa esimerkiksi terästeollisuuden tehdasolosuhteissa. Aineiden lujuusarvot yleensä alenevat lämpötilan noustessa. [3]

Tässä kappaleessa käsitellään yleisten rakennusaineiden fysikaalisia lämpöominaisuuksia. Kappaleeseen on koottu sellaisia tietoja, joista on hyötyä kuumiin olosuhteisiin sijoitettujen rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa. Rakennusaineista tarkasteltavana ovat Portland-sementtibetoni, rakenne- ja betoniteräs, kuumuutta kestävä betoni sekä mineraalivillaeristeet.

Portland-sementtibetonia lukuunottamatta tarkasteltavia rakennusaineita voidaan käyttää kuumissa lämpöolosuhteissa. Portland-sementtibetoni on yksi yleisimmistä käytössä olevista rakennusaineista, ja tässä kappaleessa on kuvattu, miksi se ei suojaamattomana sovellu kuumiin lämpöolosuhteisiin fysikaalisten lämpöominaisuuksien puolesta.

### 2.2.1 Portland-sementtibetoni

Maailman yleisin betoni on Portland-sementtibetoni, ja se on myös Suomessa eniten käytetty betonilaatu. Arkikielessä perinteisellä tai tavallisella betonilla tarkoitetaan Portland-sementtibetonia.

Portland-sementtibetoni koostuu runkoaineena toimivasta kiviaineesta ja sideaineena toimivasta Portland-sementistä, jonka tehtävänä on yhdessä veden kanssa sitoa kiviaines yhteen. Portland-sementti sisältää pääosin kalsiumoksidia ( $\text{CaO}$ ), piioksidia ( $\text{SiO}_2$ ) ja alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ainesosien ja kiviaineksen lämpökäyttäytyminen eroavat toisistaan [7].

Portland-sementtibetoni on syttymätön ja palamaton materiaali, kuten muutkin betonilaadut. Se ei levitä paloa eikä siitä haihdu myrkyllisiä kaasuja [7]. Sen osa-aineet eivät kuitenkaan kestä pitkäaikaisesti korkeita lämpötiloja [7]. Yli 100 °C:n lämpötilassa alkaa betoni hiljalleen rapautua ja halkeilla [7]. Betonin puristuslujuuden pieneneminen alkaa noin 200 °C:n lämpötilassa.

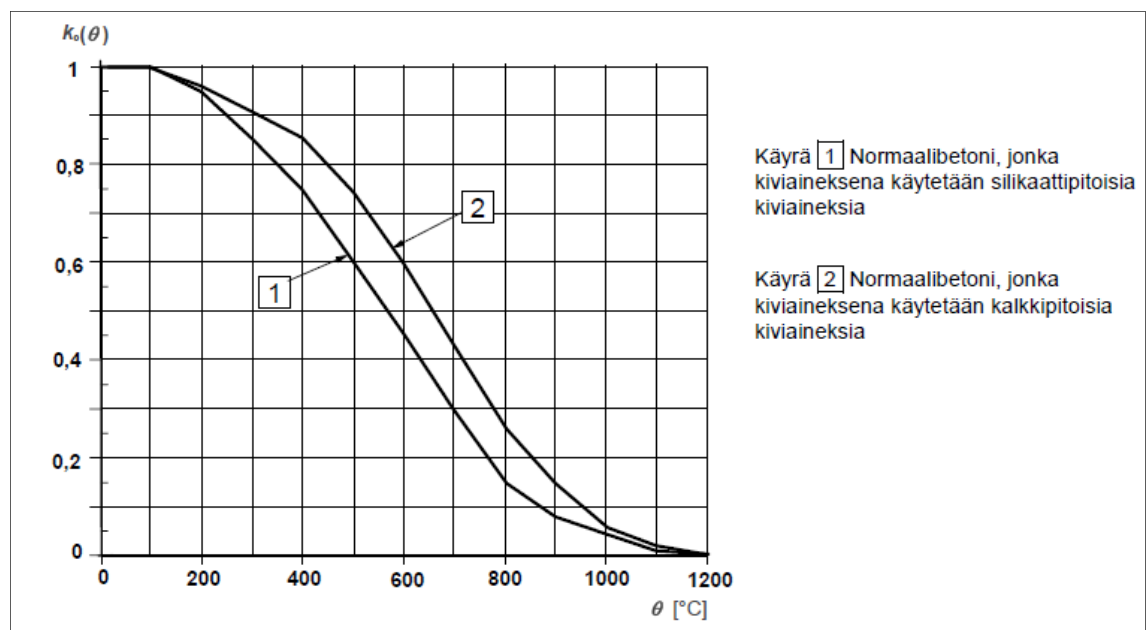
Betonin lämpötilan noustessa arvoon 100 °C sementtikiven sementtihydraateista ja kalsiumhydroksidista alkaa vapautua vesihöyryä ja betonissa oleva huokosvesi höyrystyy. Vesihöyryn vapautuminen sementtihydraateista ja kalsiumhydroksidista heikentää betonin lujuusominaisuuksia. [8]

Lämpötilassa 100–400 °C sementtikivestä poistunut vesi kutistaa sementtikiveä kiviaineen jatkaessa laajenemistaan [7]. Reaktiosta aiheutuu sementtikiveen halkeamia, ja tartunta heikkenee sementtikiven ja kiviaineen välillä [7]. Lisäksi vesihöyry aiheuttaa painetta betonin sisälle ja näin lisää betonissa olevaa jännitystä. Vesihöyryn paine on sitä suurempi, mitä korkeampi on betonin lämpötila. Vesihöyrystä aiheutuva paine aiheuttaa betoniin halkeamia, kun höyrynpaine ylittää betonin vetolujuuden. Betonin lämpötilan noustessa satoihin celsiusasteisiin höyrynpaine voi aiheuttaa höyryräjähdyksiä.

Kun betonin lämpötila nousee yli arvon 300 °C, alkaa vesisuspension vaikutuksesta muodostua vapaata kalsiumhydroksidia [9]. Tämä laskee betonin lujuutta, ja betoni vaurioituu pysyvästi [9]. SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan betonin puristuslujuudesta on lämpötilassa 300 °C jäljellä noin 85–90 %.

Kun betonin lämpötila on välillä 400–540 °C, sementtikiven kalsiumhydroksidi hajoaa ja laajenee voimakkaasti, mikä aiheuttaa betoniin halkeilua. Kun betonin lämpötila nousee yli arvon 573 °C, betonin runkoaineissa ja hienoaineissa oleva kvartsi kokee faasimuutoksen ja sen seurauksena betoni laajenee voimakkaasti. Tämä aiheuttaa betoniin voimakasta halkeilua. [8]

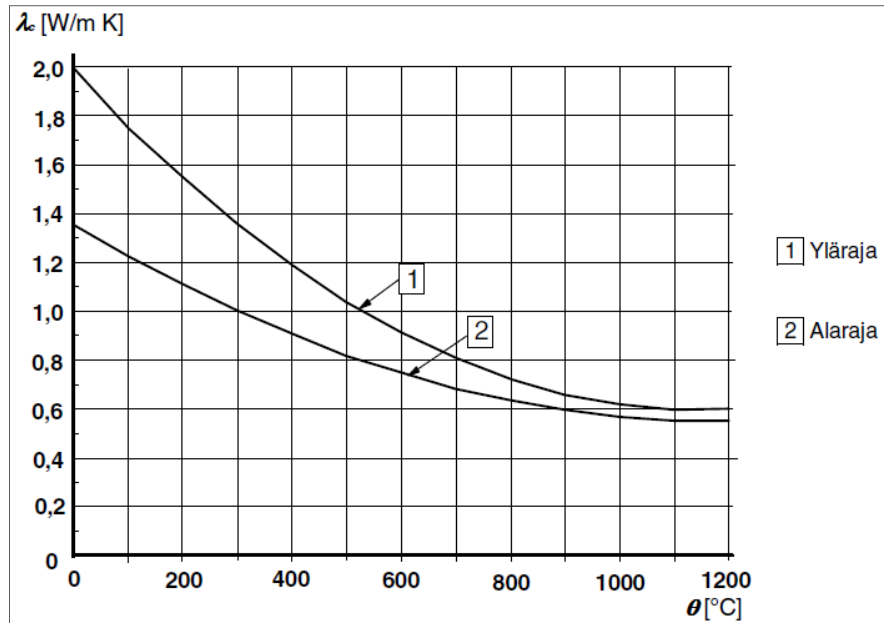
Kuvassa 2.7 on esitetty SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukainen kuvaaja lämpötilan vaikutuksesta betonin puristuslujuuteen. SFS-EN 1992-1-2:n mukaiset puristuslujuusarvot ovat suuremmat kuin vastaavat Betoninormien 2004 arvot.



**Kuva 2.7.** Lämpötilan vaikutus betonin puristuslujuuteen eri kuormitusasteilla SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan [10].

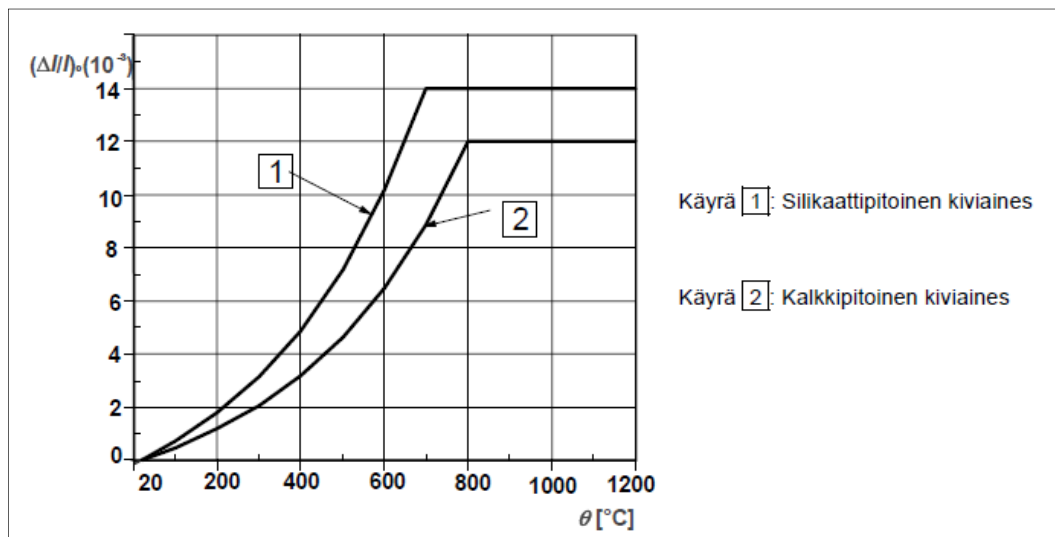
Huomioitavaa kuvassa 2.7 on, että käyrä 1 on silikaattipitoisesta kiviaineksesta koostuvalle betonille ja käyrä 2 on kalkkipitoisesta kiviaineksesta koostuvalle betonille. Portland-sementtibetoni sisältää sekä silikaa että kalkkia. Betonin jäähtyttyä normaaliin alle 100 °C:n käyttölämpötilaan, betonin jäännöslujuus on laskenut vielä jonkin verran kuumaa lämpötilaa vastaavista lujuuksista.

Kuvassa 2.8 on esitetty lämpötilan vaikutus betonin lämmönjohtavuuteen. Lämmönjohtavuus pienenee lämpötilan kasvaessa. Betonin lämmönjohtavuuden arvo on kuvassa 2.8 esitetyn ylä- ja alarajan välillä.



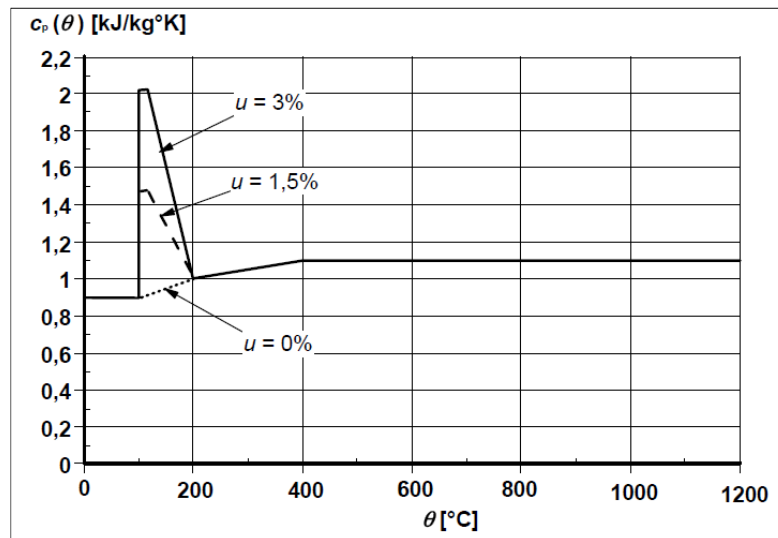
**Kuva 2.8.** Lämpötilan vaikutus betonin lämmönjohtavuuden ylä- ja alarajan arvoihin SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan [10].

Kuvassa 2.9 on esitetty lämpötilan vaikutus betonin lämpöpitenemään. Betonin lämpöpitenemä ei ole suoraviivaista, vaan se on riippuvainen lämpötilasta [11]. Betonin lämpötilan noustessa yli 700 °C:seen lämpöpitenemä pysyy vakiona, kun kyseessä on pääosin silikaattipitoisesta kiviaineksesta koostuva betoni. Kun kyseessä on pääosin kalkkipitoisesta kiviaineksesta koostuva betoni, lämpöpitenemä pysyy vakiona yli 800 °C:een jälkeen.



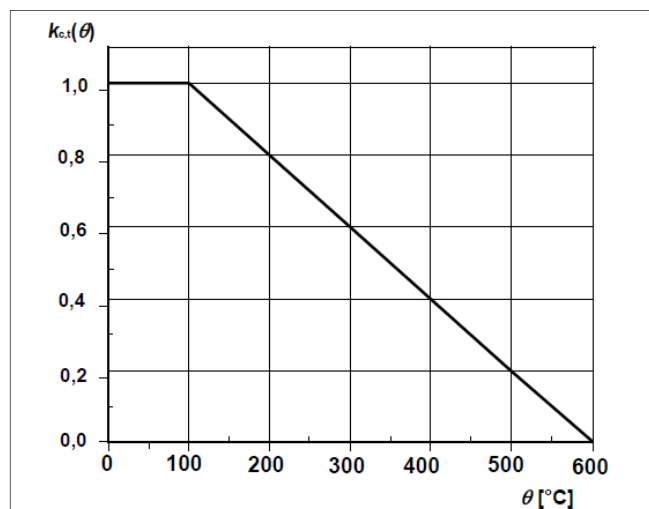
**Kuva 2.9.** Lämpötilan vaikutus betonin lämpöpitenemään SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan [10].

Kuvassa 2.10 on esitetty lämpötilan vaikutus betonin ominaislämpökapasiteettiin. Ominaislämpökapasiteetti pysyy vakiona aina 100 °C:seen asti, jolloin betonissa oleva vesi alkaa kiehua [11]. Tämä näkyy piikkinä kuvaajassa, koska veden kiehuminen vaatii paljon energiaa. Veden kiehumiseen tarvittavan energian määrä riippuu betonin suhteellisesta kosteuspitoisuudesta kuvan 2.10 mukaisesti. Lämpötilassa 100 °C tapahtuvan voimakkaan kasvun jälkeen ominaislämpökapasiteetti putoaa voimakkaasti, kunnes lämpötila on 200 °C [11]. Tämän jälkeen ominaislämpökapasiteetti kasvaa, mutta jälleen 400 °C:n ylittävissä lämpötiloissa ominaislämpökapasiteetti pysyy vakiona [11].



**Kuva 2.10.** Lämpötilan vaikutus betonin ominaislämpökapasiteettiin SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan [10].

Kuvassa 2.11 on esitetty lämpötilan vaikutus betonin vetolujuuteen. Betonin vetolujuus pysyy vakiona 100 °C:seen asti. Tämän jälkeen vetolujuus pienenee lineaarisesti. SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan lämpötilassa 600 °C vetolujuutta ei ole lainkaan jäljellä.



**Kuva 2.11.** Lämpötilan vaikutus betonin vetolujuuteen SFS-EN 1992-1-2 -standardin mukaan [10].

Alla olevissa kuvissa näkyy korkeasta lämpötilasta Portland-sementtibetonille aiheutuneita vaurioita. Kuvien 2.12 ja 2.13 rakenteisiin on kohdistunut metallisulan aiheuttamaa lämpörasitusta. Betonin pinnan lämpötila on ollut suurimmillaan yli 600 °C. Koska rakenteet sijaitsevat ulkona, on niiden alkulämpötila ollut ennen lämpörasitusta talvisin ajoittain -20 °C:n alapuolella. Äkilliset satojen celsiusasteiden suuruiset toistuvat lämpötilan muutokset ovat betonirakenteelle äärimmäisen suuria rasituksia.



**Kuva 2.12.** Korkean lämpötilan vaikutuksesta lohkeillut teräsbetonirakenne.

Kuvissa olevat rakenteet ovat lohkeilleet voimakkaasti ja betoniteräkset ovat kuoriutuneet esiin. Kuvassa 2.13 näkyy punaisena hehkuvaa metallisulaa.



**Kuva 2.13.** Korkean lämpötilan vaikutuksesta lohkeillut teräsbetonirakenne.

Kuvat 2.14 ja 2.15 ovat rullaradan alusrakenteista. Lämmönlähteinä ovat olleet rullaradalla liikkuneet noin 850 °C:n lämpöiset teräsaihiot.





*Kuva 2.14. Korkean lämpötilan vaikutuksesta lohkeillut teräsbetoninen rullaradan alusrakenne.*



*Kuva 2.15. Korkean lämpötilan vaikutuksesta lohkeillut teräsbetoninen rullaradan alusrakenne.*

### **2.2.2 Kuumuutta kestävä betoni**

Kuumuutta kestävää betoni kestää paremmin lämpörasitusta kuin Portlandsementtibetoni. Sitä käytetään olosuhteissa, joissa rakenteen lämpötila voi nousta yli

100 °C:seen [12]. Kuumuutta kestävä betoni kestää betonilaadusta riippuen hetkellisesti lämpötila-alueella 500–900 °C [13] ja pitkäaikaisesti lämpötila-alueella 200–700 °C [12].

Betonin käyttöikään vaikuttaa lämpötilan suuruuden lisäksi lämpörasitusten kesto ja lämpötilan vaihtelu. Lämpötilan vaihtelu on yleensä huomattavasti suurempi rasitus kuin altistuminen pitkäaikaiselle korkealle tasaiselle lämpötilalle. Kuumuutta kestävä betonin lämmönkesto-ominaisuudet betonilaadusta riippuen on aina selvitettävä betonin valmistajalta. [12]

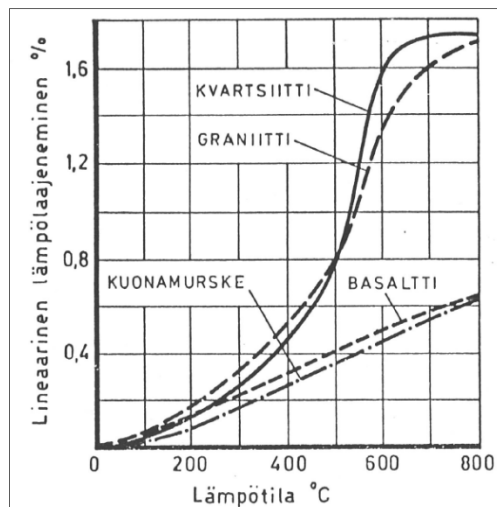
Lämpörasituksen vaikutuksesta betonin lujuusarvot pienenevät. Betonilaadut suunnitellaan siten, että lämpörasituksen aikana ja sen jälkeen puristuslujuuden pitää olla vähintään 40 % lähtötasosta [12].

Kuumuutta kestävällä betonilla on tyypillisesti korkeat lähtölujuusarvot betonoinnin jälkeen ennen altistusta lämpörasitukselle, jolloin kuutiopuristuslujuuden arvo on yli 50 MPa [14]. Korkeat lähtölujuusarvot mahdollistavat sen, että betonille jää riittävästi lujuutta lämpörasituksen jälkeen.

Kuumuutta kestävä betonin koostumus eroaa perinteisestä Portlandsementtibetonista pääosin runkoaineiden ja sideaineiden osalta. Kuumuutta kestävä betonin runkoaineina käytetään Suomessa tyypillisesti masuunikuona- ja ferrokromikuonamursketta.

Runkoaineina voidaan käyttää myös samottipala tai -murskevalmistetta, mullit-ti-piikivipala-murskevalmisteita ja vulkaanisia kivilajeja kuten basalttia, diabaasia, andesiittia ja dioriittia [15]. Kuumuutta kestävien betonilaatujen runkoaineiden on oltava kidevedettömiä [16].

Kuumuutta kestävä betonin runkoaineiden lämpölaajenemisen pitää olla pientä, ja sillä on huomattavan suuri merkitys betonin kuumuudenkestävyyteen. Runkoaineiden laajeneminen aiheuttaa betoniin halkeamia, jotka heikentävät betonin lujuusominaisuuksia rapauttaen betonia. Kuvassa 2.16 on esitetty masuunikuonamurskeen ja eri kivilajien lineaarinen lämpölaajeneminen.



**Kuva 2.16.** Masuunikuonamurskeen ja eri kivilajien lineaarinen lämpölaajeneminen korkeissa lämpötiloissa [17].

Kuvassa 2.16 näkyy, että basaltin ja kuonamurskeen lämpölaajeneminen on huomattavasti pienempää kuin graniitilla ja kvartsiitilla lämpötilan 200 °C jälkeen. Kvartsipitoisia runkoaineita ei saa kuumuutta kestävässä betonissa käyttää, koska kvartsille tapahtuu faasimuutos lämpötilassa 573 °C [13]. Kuvassa 2.16 faasimuutos näkyy selvänä lämpölaajenemisena. Myöskään graniitti ei kuvan 1 mukaan sovellu runkoaineeksi kuumuutta kestäväään betoniin.

Kuumuutta kestävä betonin sideaineina käytetään Suomessa ainakin aluminaattisementtiä (Fondu Lafarge), masuunikuonajauhetta, ja osa voi olla myös Portland-sementtiä. Jos betoni sisältää Portland-sementtiä, siinä pitää olla piipitoisia seosaineita esimerkiksi pozzolaaneja, kuonia, piipölyä ja tietynlaisia lentotuhkia, jotka pystyvät sitomaan Portland-sementistä vapautuvan kalsiumin lämpötilassa 400–540 °C. [13]

Sekä aluminaattisementti että masuunikuonajauhe tarvitsevat vähemmän vettä hydrataatioon kuin Portland-sementti [13]. Mitä vähemmän vettä betonirakenteessa on, niin sitä vähemmän rakenteessa on veden höyrystymisestä aiheutuvia jännityksiä ja siitä aiheutuvia halkeamia ja lujuudenmenetyksiä.

Muita kuumuutta kestävässä betonissa käytettyjä sideaineita ovat vesilasi, ortofosforihappo, natriumsilikofluoridi sekä nefeliiniliete [15]. Lisäaineina käytetään muun muassa hienoksi jauhettua silikaa, magnesiittia, savitiilimursketta, samottia ja polttoainekuonaa sekä polykarboksylaattipohjaisia ja rasvahapposaippuapohjaisia ainesosia [15]. Myös asbestipohjaisia lisäaineita on käytetty ennen 1990-lukua, mutta niiden käyttö on nykyään kiellettyä.

### 2.2.2.1 Kuumuutta kestävä betoni Outokummun Tornion terästehtaalla

Outokummun Tornion terästehtaalla on käytetty useita vuosia kuumuutta kestäviä betonilaatuja. Yhteistä betonilaaduille on, että niiden lieriöpuristuslujuudet ovat lähtötilanteessa ennen lämpöaltistusta vähintään 50 MPa. Osalla betonilaaduista lieriöpuristuslujuudet ovat yli 60 MPa. Betonilaatujen koostumuksia ei tässä tutkimuksessa julkaista, koska ne eivät ole julkista tietoa. [12]

Korkea lämpötila pudottaa betonilaatujen lujuutta lähtötilanteesta. Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen vuonna 2000 suorittamissa lämpörasituskokeissa erään kuumuutta kestävä betonilaadun puristuslujuus aleni noin puoleen lähtötasosta 700 °C:n lämpötilassa. Lujuuskatoa ei juuri ollut vielä 400 °C:n lämpötilassa. [12]

Kuumuutta kestävä betonin suhteitus tehdään käyttöolosuhteiden ja lämpötilarasituksen mukaan. Tietty betonilaadut kestävätkin ainakin 700 °C:n lämpöistä pitkäaikaista lämpörasitusta. Korkeimmillaan betonille voidaan sallia jopa 900 °C:n pitkäaikaista lämpörasitusta. [12]

Outokummun Tornion terästehtaalla kuumuutta kestävästä betonilaadusta valetut rakenteet ovat kestäneet hyvin jatkuvissa korkeissa lämpötiloissa kuivissa olosuhteissa. Kuumuutta kestävästä betonilaadusta toteutetut rakenteet eivät kestä korkeita lämpörasituksia, jos ne ovat hyvin kosteita. [12]

Outokummun Tornion terästehtaalla käytettyä betonilaatua on käytetty myös periteollisuudessa. Siellä rakenteet ovat olleet jatkuvasti 700 °C:n lämpötilassa. Kyseiset rakenteet ovat kestäneet hyvin lämpörasitusta ja ovat edelleen erinomaisessa kunnossa. Lämpötilan vaihtelu on kohteessa ollut vähäistä. [12]

### 2.2.2.2 Kuumuutta kestävä betoni Rautaruukin Raahen terästehtaalla

Rautaruukin Raahen terästehtaalla on käytetty useita vuosia Ruskon Betonin valmistamaa kuumuutta kestävää betonia. Tässä kappaleessa on kuvattu betonin ainesosien osalta vain ainesosien laatu. Ainesosien paino-osuus-, rakeisuus-, notkeus- hienoainespitoisuus-, vesi-sideainesuhte- ja ilmapitoisuustietoja ei ole tässä tutkimuksessa kuvattu, koska ne eivät ole julkista tietoa.

Ruskon Betonin valmistamaa kuumuutta kestävää betonia voidaan käyttää korkeissa lämpötiloissa joihin Portland-sementtibetoni ei sovellu. Betonilaatua on käytetty useita vuosia Rautaruukin Raahen terästehtaalla, ja käyttökokemusten mukaan betoni kestää ainakin 600 °C:n jatkuvaa käyttölämpötilaa.

Tuotteen runkoaineena käytetään Ympäristöministeriön tyyppihyväksymää masuunikuonamursketta. Tuotteen sideaineina ovat Ympäristöministeriön tyyppihyväksymä masuunikuonajauhe sekä sulfaatinkestävä Portland-sementti CEM I 42.5 N SR. Tuotteessa käytetään notkistimena polymeeripohjaista ainetta sekä huokostinta. [16]

VTT suoritti vuonna 1985 betonille kuumuudenkestävyyskokeita, joista on kerrottu seuraavissa alakappaleissa. Kuumuudenkestävyyskokeissa tutkittiin muun muassa betonin prismapuristuslujuutta jäähtyneenä kuumentamisen jälkeen, lieriöpuristuslujuutta kuumana sekä lieriöpuristuslujuutta pitkäaikaisen pysyvän ja vaihtelevan lämpörasituksen jälkeen.

#### *Puristuslujuus kylmänä VTT:n kokeiden mukaan*

Kuumennuksen ja jäähtymisen jälkeinen prismapuristuslujuus määritettiin 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> koeprismoilla, joita valmistettiin kolme kappaletta kutakin lämpötilaa kohti. Koeprismat sahattiin kahteen osaan, joten kuumennuksen ja jäähtymisen jälkeinen puristuslujuus mitattiin yhteensä kuudesta koekappaleesta kutakin lämpötilaa kohti. Koekappaleet kuivattiin ennen kuumennuskäsittelyä lämpökaapissa. Koekappaleiden ikä ennen kuumuuskäsittelyn aloitusta oli 28 vuorokautta. [8]

Kuumuuskäsittelyssä lämmönnostonopeus oli 50 °C/h ja pitoaika 2 h. Koekappaleiden annettiin jäähtyä uunissa huoneenlämpötilaan. Koetuloksissa oli prismapuristuslujuudet esitetty kuuden yksittäisen tuloksen keskiarvoina ja hajonta variaatiokertoimella. Lämpötiloja 400–700 °C vastaavat prismapuristuslujuudet kappaleen jäähtyttyä huoneenlämpötilaan on esitetty taulukossa 2.1. [8]

**Taulukko 2.1.** Lämpötiloja 400–700 °C vastaavat prismapuristuslujuudet jäähtymisen jälkeen [8].

Kuumennuslämpötila [°C]	Prismapuristuslujuus huoneen lämmössä [MPa]
400	45,0
500	42,6
600	35,1
700	19,7

### ***Kuumapuristuslujuus VTT:n kokeiden mukaan***

VTT testasi betonin lieriöpuristuslujuutta betonin ollessa kuumana. Kuumapuristuslujuuden määrittämisessä käytettiin Ø 50 x 50 mm<sup>2</sup> lieriöitä, jotka oli porattu 21 vuorokauden ikäisistä normisäilytetyistä 150 x 150 x 150 mm<sup>3</sup> kuutioista. Koelieriöt kuivattiin ennen kuumapuristuslujuuden määrittämisestä lämpökaapissa, ja niiden ikä määrittämisaloi- tushetkellä oli 28 vuorokautta. Lieriöiden päät tasoitettiin timanttisahalla. Lämpötilan nostonopeus oli 50 °C/h ja pitoaika ennen puristusta 1 h. [8]

Kuumapuristuslujuudet määritettiin lämpötiloissa 200 °C, 400 °C, 600 °C ja 700 °C. Koetuloksissa oli kuumapuristuslujuudet esitetty kolmen yksittäisen tuloksen keskiarvoina ja hajonta variaatiokertoimella. Lämpötiloja vastaavat lieriöpuristuslujuuden koetulokset on esitetty taulukossa 2.2. [8]

**Taulukko 2.2.** Lämpötiloja 200–700 °C vastaavat lieriöpuristuslujuudet korkeissa lämpötiloissa [8].

Kuumennuslämpötila [°C]	Lieriöpuristuslujuus [MPa]
200	28,0
500	32,1
600	28,6
700	24,5

### ***Puristuslujuus pitkäaikaisen pysyvän lämpörasituksen jälkeen***

Pitkäaikaisen pysyvän ja vaihtelevan lämpörasituksen jälkeisen puristuslujuuden määrittämisessä käytettiin samanlaisia ja samalla tavalla kuivattuja koekappaleita kuin kuumapuristuslujuuden määrittämisessäkin. [8]

Pitkäaikaisen pysyvän lämpörasituksen vaikutusta betonin lieriöpuristuslujuuteen tutkittiin 400 °C:n ja 20 °C:n lämpötiloissa, kun koekappaleita oli poltettu 400 °C:ssa 10 d:n ajan. Lämpörasitusta vastaavien lieriöpuristuslujuuksien koetulokset on esitetty taulukossa 2.3. Koetuloksissa kuumapuristuslujuudet on esitetty kolmen yksittäisen tuloksen keskiarvoina ja hajonta variaatiokertoimella. [8]

### ***Puristuslujuus vaihtelevan lämpörasituksen jälkeen***

Pitkäaikaisen vaihtelevan lämpörasituksen vaikutusta betonin lieriöpuristuslujuuteen tutkittiin 400 °C:n ja 20 °C:n lämpötiloissa, kun lämpötilaa nostettiin 400 °C:seen ja

laskettiin 20 °C:seen viiden vuorokauden aikana viisi kertaa. Lämpörasitusta vastaavien lieriöpuristuslujuuksien tutkimustulokset on esitetty taulukossa 2.3. Koetuloksissa kuumapuristuslujuudet on esitetty kolmen yksittäisen tuloksen keskiarvoina ja hajonta variaatiokertoimella. [8]

**Taulukko 2.3.** Lieriöpuristuslujuudet pitkäaikaisen pysyvän lämpörasituksen sekä vaihtelevan lämpörasituksen jälkeen [8].

Tarkastelulämpötila [°C]	Lieriöpuristuslujuus, pysyvä lämpörasitus [MPa]	Lieriöpuristuslujuus, vaihteleva lämpörasitus [MPa]
20	37,7	32,8
400	27,9	32,6

### 2.2.3 Rakenneteräs

Teräs on rakennusmateriaali, jonka lujuusominaisuudet heikkenevät nopeasti lämpötilan ylittäessä 300 °C. Teräksen myötölujuus ja vetolujuus pienenevät, ja nyrkkisääntönä voidaan pitää, että teräksen lämpötilan ollessa 600 °C lujuutta on jäljellä 25–45 % normaalilämpötilan lujuuteen verrattuna. Teräksen materiaaliominaisuuksien muuttuminen on otettava huomioon määritettäessä teräsrakenteen kestävyyttä korkeissa lämpötiloissa. [18]

Teräksen lämpötilan ylittäessä 400 °C, lujuusominaisuudet alkavat laskea, ja virumisen sekä väsymisen vaikutus pitää huomioida. Teräksen hienorakenteen muuttuminen alkaa lämpötilassa 735 °C. Jos teräksen lämpötila nousee yli arvon, jossa sen hienorakenne muuttuu, teräksen lujuuden jäännösarvot laskevat. Hienorakenteen muuttuminen jättää teräkseen jäännösjännityksiä, jotka myös laskevat teräksen lujuusarvoja.

Teräkselle on ominaista suuri lämpölaajeneminen, joka voi korkeissa lämpötiloissa johtaa palautumattomiin muodonmuutoksiin yhdessä kimmokertoimen ja lujuuden alenemisen kanssa. Muodonmuutoksia voi lisätä myös teräksen viruma, jonka vaikutus korkeissa lämpötiloissa kasvaa merkittävästi.

Kuvassa 2.16 näkyy, kuinka korkea lämpötila on vaurioittanut teräsrakenteita. Rakenteiden suojamaali on palanut ja rakenteita ympäröi oksidikerros. Osa teräspalkkien ylälaipoista on sulanut ja muuttanut muotoaan palautumattomasti.

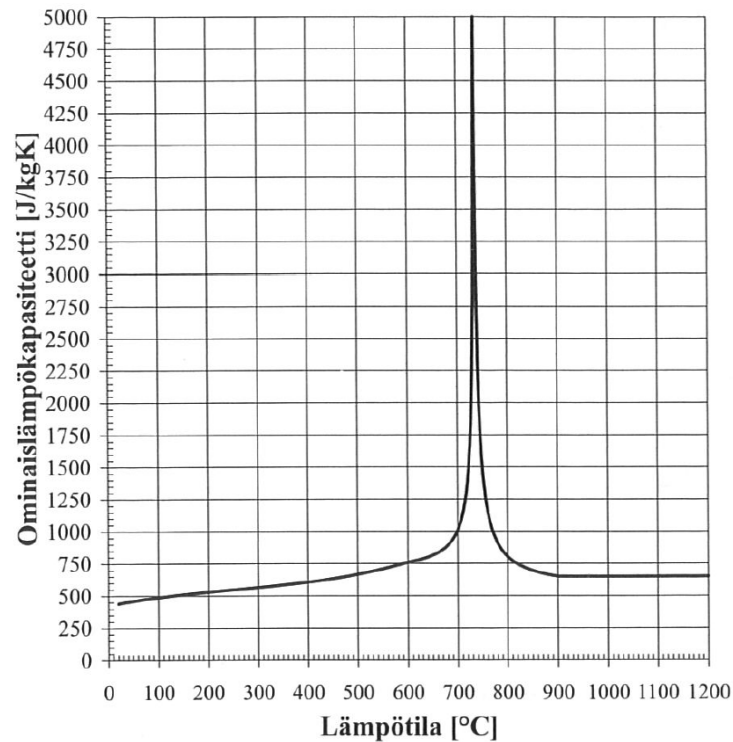




**Kuva 2.16.** Korkean lämpötilan vaikutuksesta vaurioitunut teräsrakenne.

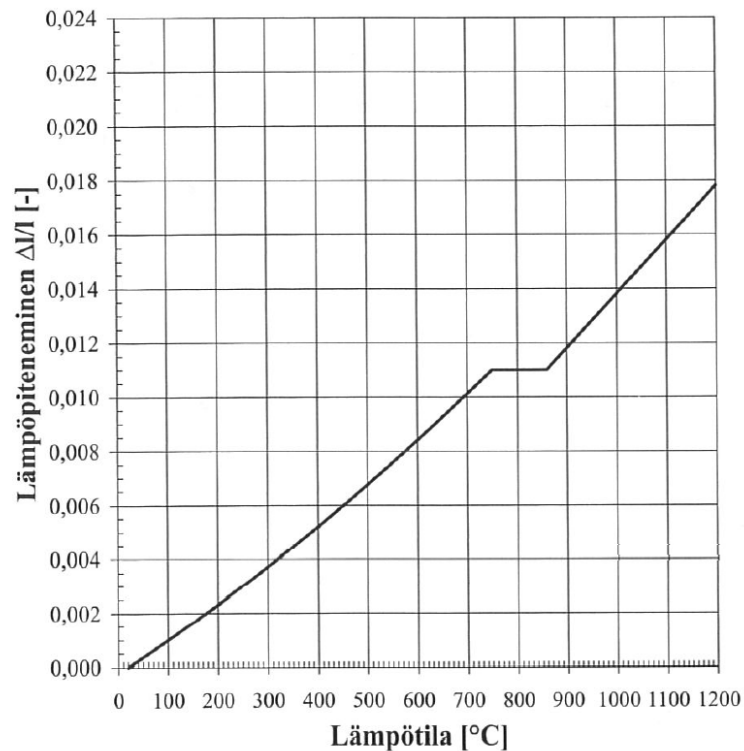
Alla on selostettu tarkemmin rakenneteräksen ominaislämpökapasiteetista, lämpöpitenemisestä, lämmönjohtavuudesta sekä myötörajasta, suhteellisuusrajasta ja kimmokerroimesta eri lämpötiloissa. Kuvaajissa ja taulukossa esitetyt arvot koskevat hiiliterästä ja ne ovat SFS EN 1993-1-2 -standardin mukaisia.

Teräksen ominaislämpökapasiteetti on 20 °C:n lämpötilassa noin 450 J/kgK, jonka jälkeen se kasvaa suhteellisen tasaisesti aina 650 °C:seen saakka, jolloin se on noin 820 J/kgK. Tämän jälkeen ominaislämpökapasiteetti kasvaa erittäin nopeasti 735 °C:seen saakka, jolloin saavutetaan huippuarvo, noin 5000 J/kgK. Nopeaa nousua seuraa nopea lasku, ja lämpötilan saavuttaessa noin 900 °C ominaislämpökapasiteetti on laskenut noin 650 J/kgK:een. Tämän jälkeen ominaislämpökapasiteetti pysyy vakiona. Ominaislämpökapasiteetin voimakas kasvu juuri ennen 735 °C:een lämpötilaa selittyy teräksen hienorakenteen muutoksella, joka sitoo paljon energiaa. Ominaislämpökapasiteetti eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 2.17. [11]



**Kuva 2.17.** Lämpötilan vaikutus hiiliteräksen ominaislämpökapasiteettiin [18].

Teräksen lämpöpitenemä eli lämpölaajeneminen kasvaa suoraviivaisesti, mutta lämpötilavälillä 735–860 °C se on vakio, koska teräksen hienorakenne muuttuu. Hienorakenteen muutos sitoo paljon energiaa, minkä takia lämpölaajeneminen pysähtyy. Lämpöpiteneminen eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 2.18. [11]

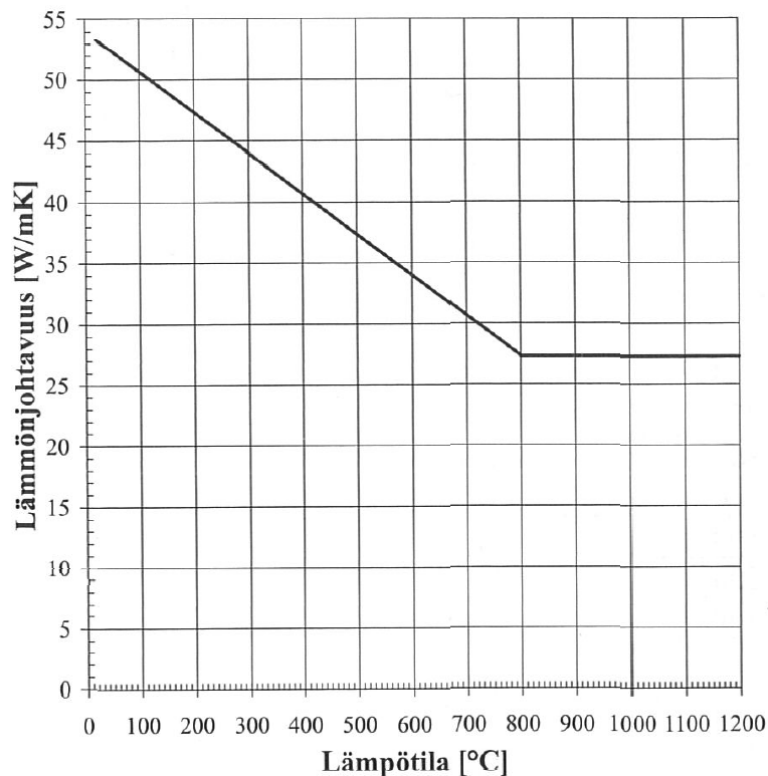


**Kuva 2.18.** Lämpötilan vaikutus hiiliteräksen lämpöpitenemiseen [18].



Teräksen lämmönjohtavuus on 20 °C:n lämpötilassa noin 54 W/mK. Lämpötilan kasvaessa lämmönjohtavuus pienenee, kunnes noin 800 °C:n lämpötilassa se on noin 28 W/mK. Lämpötilan edelleen kasvaessa lämmönjohtavuus pysyy vakiona. Lämmönjohtavuus eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 2.19. [11]

Lämmönjohtavuuden pieneneminen lämpötilan noustessa ei ole yleistä rakennusmateriaaleille. Ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan noustessa, toisin kuin rakenneteräksen lämmönjohtavuus.



**Kuva 2.19.** Lämpötilan vaikutus hiiliteräksen lämmönjohtavuuteen [18].

Taulukossa 2.4 on esitetty teräksen tehollisen myötörajan pienennystekijä  $k_{y,0}$ , suhteellisuusrajan pienennystekijä  $k_{p,0}$  sekä kimmokertoimen pienennystekijä  $k_{E,0}$ . Pienennystekijät eri lämpötiloissa ovat suhteessa 20 °C:n lämpötilaa vastaaviin arvoihin. Huomioitavaa taulukossa on, että myötörajan pieneneminen alkaa lämpötilassa 400 °C ja suhteellisuusrajan sekä kimmokertoimen 100 °C:n lämpötilassa.

**Taulukko 2.4.** Hiiliteräksen jännitys-venymäyhteyden pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa [19].

Teräksen lämpötila $\theta_a$ [°C]	Pienennystekijät lämpötilassa $\theta_a$ suhteessa 20°C lämpötilaa vastaaviin arvoihin $f_y$ ja $E_a$		
	Tehollisen myötörajan pienennystekijä (suhteessa arvoon $f_y$ ) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon $f_y$ ) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon $E_a$ ) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000
HUOM! Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarista interpolointia käyttäen.			

Taulukossa 2.5 on esitetty pienennystekijä  $k_{b,\theta}$  hiiliteräksisille ruuveille ja muttereille korkeissa lämpötiloissa. Pienennystekijää käytetään kaikille lujuusluokille. Huomioitavaa on, että pienennystekijän arvo pienenee jo 100 °C:n kohdalla. [37]

**Taulukko 2.5.** Hiiliteräksisten ruuvien ja muttereiden pienennystekijä korkeissa lämpötiloissa [19] [37].

Lämpötila $\theta_a$	Ruuvien pienennystekijä $k_{b,\theta}$
20 °C	1,000
100 °C	0,968
150 °C	0,952
200 °C	0,935
300 °C	0,903
400 °C	0,775
500 °C	0,550
600 °C	0,220
700 °C	0,100
800 °C	0,067
900 °C	0,033
1000 °C	0,000

Taulukossa 2.6 on esitetty pienahitsin lujuuden pienennystekijä  $k_{w,\theta}$  korkeissa lämpötiloissa. Pienahitsien lujuus alkaa pienentyä jo 300 °C:n jälkeen, ja se pienenee nopeammin kuin perusaineen lujuus. Pienennystekijää voidaan käyttää myös päittäishitseille. [37]

**Taulukko 2.6.** Hitsien lujuuden pienennystekijä korkeissa lämpötiloissa [19] [37].

Lämpötila $\theta_a$	Hitsien pienennystekijä $k_{w,\theta}$
20 °C	1,000
100 °C	1,000
150 °C	1,000
200 °C	1,000
300 °C	1,000
400 °C	0,876
500 °C	0,627
600 °C	0,378
700 °C	0,130
800 °C	0,074
900 °C	0,018
1000 °C	0,000

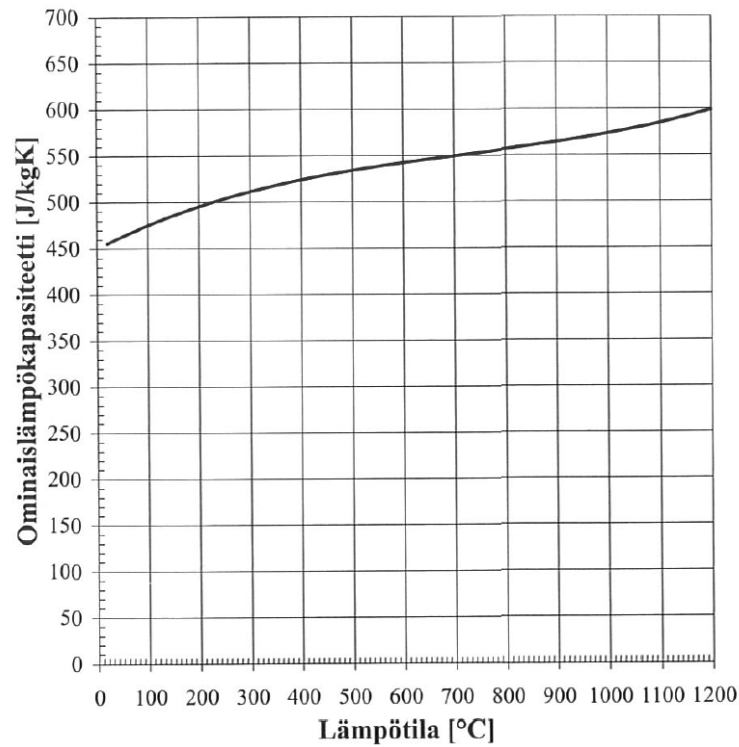
## 2.2.4 Ruostumaton teräs

Ruostumattomia teräslaatuja on olemassa useita. Mikrorakenteensa perusteella ruostumattomat teräkset jaetaan austeniittisiin, ferriittisiin, austeniittis-ferriittisiin sekä martensiittisiin pääryhmiin. Teräslaatuojen lujuusominaisuudet eri lämpötiloissa sekä lämpökäyttäytyminen riippuvat materiaalin seostuksesta. Tässä kappaleessa esitetyt tiedot koskevat yleisesti rakentamisessa käytettyä austeniittista ruostumatonta teräslajia 1.4301. Muille rakentamisessa käytetyille teräslajeille tiedot löytyvät standardin SFS EN 1993-1-2: 2005 liitteestä C.

Rakenne- ja betoniterästä ei saa käyttää suuriin magneettikenttiin sijoittuvissa rakenteissa, koska se magnetisoituu. Tällöin myös teräksen lämpötila nousee erittäin korkealle tasolle. Austeniittisia teräslaatuja voidaan käyttää teräs- ja teräsbetonirakenteissa paikoissa, joissa on suuria magneettikenttiä. Suuria magneettikenttiä on terästeollisuudessa esimerkiksi valokaariuunien läheisyydessä sekä kompensointilaitoksissa.

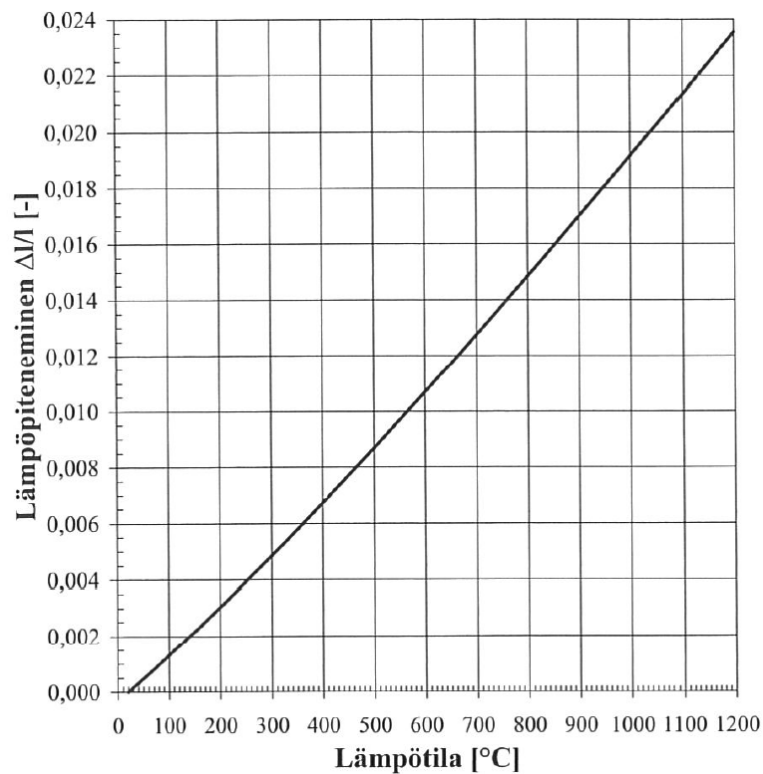
Alla on selostettu tarkemmin ruostumattoman teräksen 1.4301 ominaislämpökapasiteetista, lämpöpitenemisestä, lämmönjohtavuudesta sekä teräksen myötörajan, suhteellisuusajan ja kimmokertoimen eri lämpötiloissa. Kuvaajissa ja taulukossa esitetyt arvot ovat SFS EN 1993-1-2 -standardin mukaisia.

Kuvassa 2.20 on esitetty lämpötilan vaikutus ruostumattoman teräksen 1.4301 ominaislämpökapasiteettiin. Toisin kuin rakenneteräksellä, ruostumattoman teräksen hienorakenne ei muutu juuri ennen 735 °C:n lämpötilaa. Näin ollen ominaislämpökapasiteetin arvossa ei ole piikkiä. Muilta osin ominaislämpökapasiteetin arvo eri lämpötiloissa on varsin lähellä rakenneteräksen vastaavia arvoja.



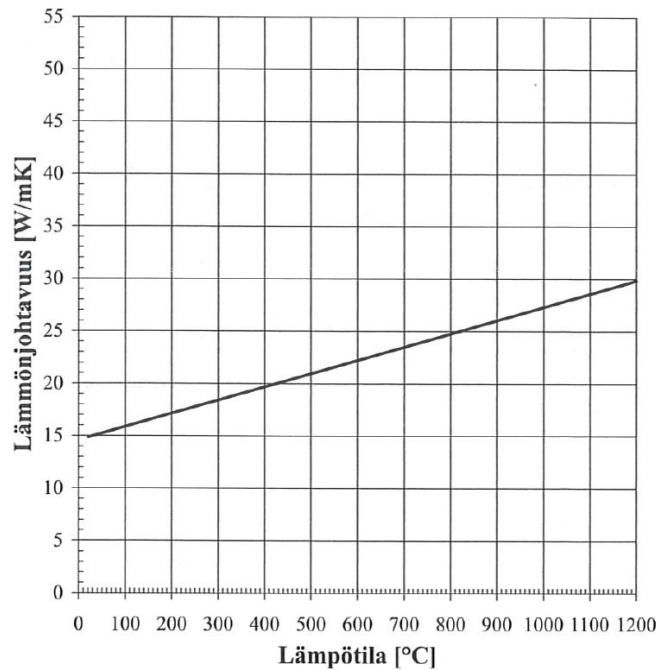
**Kuva 2.20.** Lämpötilan vaikutus ruostumattoman teräksen ominaislämpökapasiteettiin [18].

Kuvassa 2.21 on esitetty lämpötilan vaikutus ruostumattoman teräksen lämpöpiteneeseen. Lämpöpiteneisen arvot ovat noin 30 % korkeammat kuin rakenneteräksellä.



**Kuva 2.21.** Lämpötilan vaikutus austeniittisen ruostumattoman teräksen lämpöpiteneeseen [18].

Kuvassa 2.22 on esitetty lämpötilan vaikutus ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuuteen. Lämmönjohtavuus kasvaa lineaarisesti lämpötilaan 1200 °C asti. Ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus käyttäytyy lämpötilan kasvaessa täysin päinvastoin kuin rakenneteräksen lämmönjohtavuus, joka pienenee lämpötilan kasvaessa.



**Kuva 2.22.** Lämpötilan vaikutus ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuuteen [18].

Taulukossa 2.7 on esitetty ruostumattoman teräksen kimmokertoimen pienennystekijä  $k_{E,\theta}$ , 0,2-rajan pienennystekijä  $k_{0,2,\theta}$ , vetomurtolujuuden pienennystekijä  $k_{u,\theta}$ , sekä tekijä  $k_{2\%,\theta}$  myötörajan  $f_{y,\theta}$  määrittämiseksi. Pienennystekijät eri lämpötiloissa ovat suhteessa 20 °C:n lämpötilaa vastaaviin arvoihin. Myötörajan  $f_{y,\theta}$  arvo voidaan karkeasti katsoa kuvasta 2.23 tai se voidaan laskea kaavalla:

$$f_{y,\theta} = f_{0,2p,\theta} + k_{2\%,\theta} (f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta}), \quad (2.6)$$

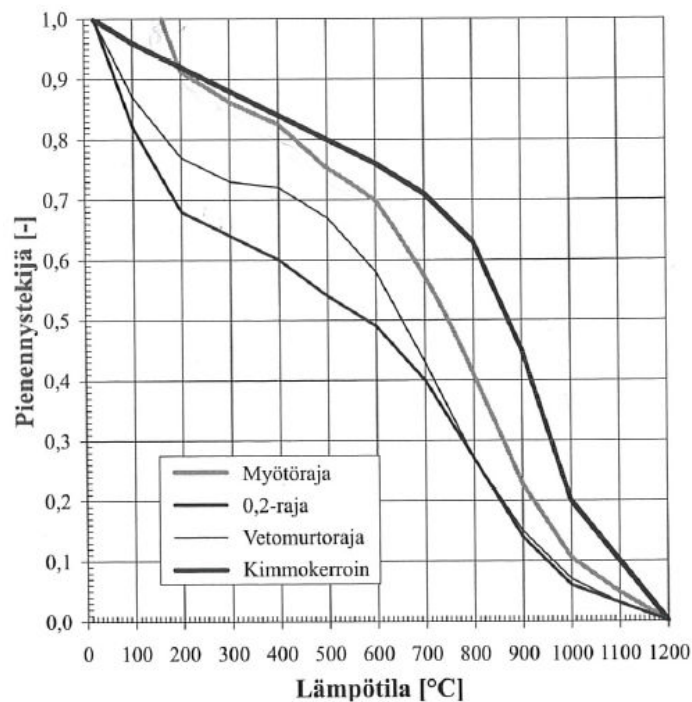
missä

$f_{0,2p,\theta}$	on $k_{0,2,\theta} f_y$ ,
$f_{u,\theta}$	on $k_{u,\theta} f_u$ ,
$f_y$	on teräksen myötöraja lämpötilassa 20 °C,
$f_u$	on teräksen vetomurtoraja lämpötilassa 20 °C.

**Taulukko 2.7.** Lämpötilan vaikutus austeniittisen (CrNi) ruostumattoman teräslajin 1.4301 jännitys-muodonmuutosyhteyden pienennystekijöihin [18].

Teräksen lämpötila $\theta_a$ [°C]	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon $E_a$ ) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$	0,2-rajan pienennystekijä (suhteessa arvoon $f_y$ ) $k_{0,2,\theta} = f_{0,2,\theta} / f_y$	Vetomurtolujuuden pienennystekijä (suhteessa arvoon $f_u$ ) $k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u$	Tekijä myötö- rajan $f_{u,\theta}$ määrittämisek- si $k_{2\%,\theta}$
20	1,00	1,00	1,00	0,26
100	0,96	0,82	0,87	0,24
200	0,92	0,68	0,77	0,19
300	0,88	0,64	0,73	0,19
400	0,84	0,60	0,72	0,19
500	0,80	0,54	0,67	0,19
600	0,76	0,49	0,58	0,22
700	0,71	0,40	0,43	0,26
800	0,63	0,27	0,27	0,35
900	0,45	0,14	0,15	0,38
1000	0,20	0,06	0,07	0,40
1100	0,10	0,03	0,03	0,40
1200	0,00	0,00	0,00	0,40

Taulukon 2.7 mukaan kimmokertoimen sekä vetomurtolujuuden pieneminen alkaa jo lämpötilassa 20 °C. Kuvan 2.23 mukaan ruostumattoman teräksen myötörajan pieneminen alkaa noin 160 °C:n lämpötilassa. Kaikki kuvan 2.23 mukaiset pienennystekijät ovat vastaavia rakenneteräksen arvoja pienempiä.



**Kuva 2.23.** Lämpötilan vaikutus austeniittisen (CrNi) ruostumattoman teräslajin 1.4301 lujuuden ja kimmokertoimen pienennystekijöihin [18].

Taulukossa 2.8 on esitetty DIN 267 –standardin osan 13 mukaiset ruostumattomista tai haponkestävistä teräksistä koostuvien ruuvien ja muttereiden suurimmat sallitut käyttölämpötilat. Metalliseoksia NiCr 20 TiAl ja X 5 NiCrTi 26 15 voidaan käyttää jopa 700 °C:n käyttölämpötilassa.

**Taulukko 2.8.** Ruostumattomien ruuvien ja muttereiden kuumankestävyys [20].

Lämpötila °C	Raaka-aineen lyhytnimi	Tunnus	Raaka-aineen numero
+350 °C saakka	C 35 N	Y	1.0501
	Cq 35	YQ	1.1172
	Ck 35	YK	1.1181
+400 °C saakka	24 CrMo 5	G	1.7258
+540 °C saakka	21 CrMoV 57	GA	1.7709
+540 °C saakka	40 CrMoV 47	GB	1.7711
+580 °C saakka	X 22 CrMoV	V	1.4923
+580 °C saakka	X 19 CrMoVNbN	VW	1.4913
+650 °C saakka	X 8 CrNiMoBNv 16 16	S	1.4986
+700 °C saakka	X 5 NiCrTi 26 15	SD	1.4980
+700 °C saakka	NiCr 20 TiAl	SB	2.4952

Taulukossa 2.9 on esitetty DIN EN 10269 –standardin mukaiset ruostumattomista tai haponkestävistä teräksistä koostuvien ruuvien ja muttereiden lämpötiloja vastaavat 0,2-rajat  $f_{0.2p,0}$  lämpötila-alueella 20–600 °C.

**Taulukko 2.9.** Ruostumattomien ruuvien ja muttereiden lämpötiloja vastaavat 0,2-rajat [21].

Material abbreviation		Diameter range	Tensile strenght	Minimum value for the 0,2% limit R <sub>p0,2</sub> at N/mm <sup>2</sup> at a temperature [° C] of						
Name	Material number	d [mm]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	20	100	200	300	400	500	600
hardened and tempered steels										
C35E	1.1181	d ≤ 60	500 to 650	300	270	229	192	173		
35B2	1.5511	d ≤ 60	500 to 650	300	270	229	192	173		
42CrMo4	1.7225	d ≤ 60	860 to 1060	730	702	640	562	475	375	
40CrMoV4-7	1.7711	d ≤ 100	850 to 1000	700	670	631	593	554	470	293
X22CrMoV12-1	1.4923	d ≤ 160	800 to 950	600	560	530	480	420	335	
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	d ≤ 160	900 to 1050	750	701	651	627	577	495	305
work-hardened austenitic steels										
X5CrNi18-10	1.4301	d ≤ 35	700 to 850	350	155	127	110	98	92	
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	d ≤ 35	700 to 850	350	175	145	127	115	110	
X5NiCrTi26-5	1.4980	d ≤ 160	900 to 1150	600	580	560	540	520	490	430



### 2.2.5 Betoniteräs

Betoniteräksinä käytetään kuumavalssattuja ja kylmämuokattuja teräslaatuja. Taulukossa 2.10 on esitetty betoniterästen lämpötilasta riippuvia pienennystekijöitä. Pienennystekijät eri lämpötiloissa ovat suhteessa 20 °C:n lämpötilaa vastaaviin arvoihin.

**Taulukko 2.10.** Lämpötilan vaikutus betoniteräksen pienennystekijöihin [10].

Teräksen lämpötila $\theta$ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	kuuma- valssattu	kylmä- muokattu	kuuma- valssattu	kylmä- muokattu	kuuma- valssattu	kylmä- muokattu
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Taulukossa on esitetty pienennystekijät maksimijännitystasolle  $f_{sy,\theta}$ , suhteellisuusrajalle  $f_{sp,\theta}$  sekä lineaariselle kimmoisen alueen kaltevuudelle  $E_{s,\theta}$  eri lämpötiloissa. Taulukossa olevat kuumavalssatun betoniteräksen pienennystekijät ovat täsmälleen samat kuin kuumavalssatulla rakenneteräksellä. Kylmämuokatun betoniteräksen maksimijännitystason arvot ovat yli 300 °C:n lämpötilassa pienempiä, kuin kuumavalssatun teräksen. Näin ollen sen käyttöä korkeissa lämpötiloissa tulee välttää, jos teräslaatu voidaan käyttää kuumavalssattua terästä.

### 2.2.6 Mineraalivilla

Tähän kappaleeseen on koottu vain sellaisia mineraalivillaeristeitä, jotka kestävät kuumuutta. Mineraalivilloista on esitetty tuotevalmistajien ilmoittamia fysikaalisia lämpöominaisuuksia sekä käyttöön liittyviä tietoja.

Kappaleeseen sisällytettyjen mineraalivillatuotteiden korkein jatkuva käyttölämpötila on välillä 660–1400 °C tuotteesta riippuen. Mineraalivilloille on tyypillistä, että niiden lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Kun lämpötila nousee tiettyyn arvoon asti, alkavat mineraalivillat sulaa.



Kuumissa olosuhteissa rakennetta suojaava mineraalivillakerros pitää tarvittaessa pinnoittaa. Yleensä pinnoittamattoman mineraalivillakerros kerää pölyä, ei kestä metallisulan roiskeita sekä on epäesteettinen. Mineraalivilloilla suojataan rakenteita korkeilta lämpötiloilta sekä suurilta lämpötilojen vaihteluilta.

### 2.2.6.1 Käyttölämpötilaa 660 °C kestävä mineraalivilla

Esimerkki käyttölämpötilaa 660 °C kestävästä mineraalivillasta on tuotenimeltään Isover Ultimate U Protect Slab. Se on mineraalivillatuote, joka sisältää pienen määrän mineraaliöljyä. Sen korkein käyttölämpötila on 660 °C ja sulamislämpötila on yli 1000 °C. [22]

U Protect Slab palonsuojalevy soveltuu lämpöeristeeksi tavanomaisten rakenteiden lisäksi esimerkiksi kanaville ja piipuille. Tuotetta on saatavilla alumiinipinnoitettuna, mikä parantaa tuotteen lämpösäteilyn heijastuskykyä. Taulukossa 2.11 on valmistajan tuotteelle ilmoittamat lämpötiloja 10–600 °C vastaavat lämmönjohtavuusarvot. [22]

**Taulukko 2.11.** Lämmönjohtavuusarvot korkeissa lämpötiloissa [22].

U Protect -tuotteet						
		U Protect Slab 4.0 N	U Protect Slab 4.0 V1	U Protect Slab 4.0 Alu1	U Protect Wired Mat 4.0 N	U Protect Wired Mat 4.0 Alu1
Pinnoitteet	Ei pinnoitetta	x			x	
	Lasihuopa		x			
	AL			x		x
Lämmönjohtavuus W/mK keskilämpötilassa EN 12667 mukaan	10	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
	50	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
	100	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039
	200	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
	300	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
	400	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098
	500	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130
	600	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170

### 2.2.6.2 Käyttölämpötilaa 900 °C kestävä mineraalivilla

Esimerkki käyttölämpötilaa 900 °C kestävästä mineraalivillasta on tuotenimeltään Paroc High Temperature Slab. Se on kivivillapohjainen eriste. Tuotteen raaka-aineesta yli 95% on kiveä ja loput 5 % koostuvat kovetetusta hartsista ja öljystä. Valmistuksessa käytetyt kivilajit ovat pääosin gabro, anortosiitti ja dolomitiitti. Kivivilla on palamatonta, eikä siitä lähde haitallisia päästöjä ilmaan. [23]

Tuotteen suurin käyttölämpötila on 900 °C. Kuituja sitova sideaine häviää noin 250 °C:n lämpötilassa, mikä heikentää eristeen kykyä kestää mekaanista rasitusta. Kivivillan kutistuspiste on lämpötila-alueella 950–1050 °C. Kutistuspisteen saavutettuun tuote menettää eristysominaisuutensa pysyvästi. [23]

Tuote kestää myös hieman puristusjännitystä. Tuotetta käytetään lämmöneristeenä muun muassa kattiloiden ja uunien luukuissa, kuumailma- ja savukaasukanavissa sekä lämpökäsittelyuuneissa, kattiloissa ja muissa prosessilaitteissa. Taulukossa 2.12 on valmistajan tuotteelle ilmoittamat lämpötiloja 10–500 °C vastaavat lämmönjohtavuusarvot. [23]

**Taulukko 2.12.** Lämmönjohtavuusarvot korkeissa lämpötiloissa [23].

Lämmönjohtavuus		
Kuvaus	Arvo	Standardin mukaisesti
Lämmönjohtavuus 10 °C, $\lambda_{10}$	0.055 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 50 °C, $\lambda_{50}$	0.057 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 100 °C, $\lambda_{100}$	0.060 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 150 °C, $\lambda_{150}$	0.064 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 200 °C, $\lambda_{200}$	0.068 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 300 °C, $\lambda_{300}$	0.081 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 400 °C, $\lambda_{400}$	0.097 W/mK	SFS 5356
Lämmönjohtavuus 500 °C, $\lambda_{500}$	0.118 W/mK	SFS 5356

### 2.2.6.3 Käyttölämpötilaa 1100 °C kestävä mineraalivilla

Esimerkki käyttölämpötilaa 1100 °C kestävästä mineraalivillasta on tuotenimeltään Promaglaf HTK 1200. Se on keraamisista kuiduista valmistettu eriste. Tuote sisältää pääosin piidioksidia ( $\text{SiO}_2$ , 62–67 %) sekä alumiinioksidia ( $\text{SiO}$  28–33 %). Tarkemmat tiedot tuotteen sisältämistä mineraaleista ovat taulukossa 2.13. [24]

Tuotteen suurin käyttölämpötila on 1100 °C, ja sitä käytetään rakenteissa, joilta vaaditaan lämmöneristyskykyä ja kuumuudenkestoa. Tuote kestää hetkellisesti lämpötilaa 1260 °C. [24]

Valmistajan mukaan tuote on myrkytön, eikä siitä kuumana erityy myrkyllisiä kaasuja. Taulukossa 2.13 on valmistajan tuotteelle ilmoittamat lämpötiloja 400–1000 °C vastaavat lämmönjohtavuusarvot. [24]

**Taulukko 2.13.** Lämmönjohtavuusarvot korkeissa lämpötiloissa [24].

Product name		PROMAGLAF®-HTK 1200 blankets and bulk		
Colour		Wit		
Classification temperature		1200		°C
Max. Use Limit		1100		°C
Density		96 - 128 - 160		(kg/m³)
Shrinkage after 24 h at 1100°C		1,2		%
Melting point		1275		°C
Thermal Conductivity (W/mK)		96		128
mean temperature		400°C		0,110
		600°C		0,167
		800°C		0,225
		1000°C		0,295
				0,090
				0,140
				0,186
				0,244
Chemical Analysis:		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,5 – 0,8
		SiO <sub>2</sub>		62 - 67
		MgO		1 - 6
		CaO		28- 33
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,3 – 0,5
Fiber Diameter		3,0		µm
Fiber Length		203		mm

#### 2.2.6.4 Käyttölämpötilaa 1400 °C kestävä mineraalivilla

Esimerkki käyttölämpötilaa 1400 °C kestävästä mineraalivillasta on tuotenimeltään Cronvall Fiberfrax Durablanket Z. Se on keraamisista kuiduista valmistettu eriste. Tuote sisältää pääosin silikaa ( $\text{SiO}_2$ , 52–56 %), alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 28–32 %) sekä zirkoniumoksidia ( $\text{ZrO}_2$ , 14–33 %). Tarkemmat tiedot tuotteen sisältämistä mineraaleista ovat taulukossa 2.14. [25]

Tuotteen suurin käyttölämpötila on 1400 °C. Hetkellisesti tuote kestää lämpötilaa 1600 °C. Valmistajan mukaan tuotetta käytetään muun muassa uunien vuorauksissa ja lämpökattiloiden eristeenä. Taulukossa 2.14 on valmistajan tuotteelle ilmoittamat lämpötiloja 800–1200 °C vastaavat lämmönjohtavuusarvot. [25]

**Taulukko 2.14.** Lämmönjohtavuusarvot korkeissa lämpötiloissa [25].

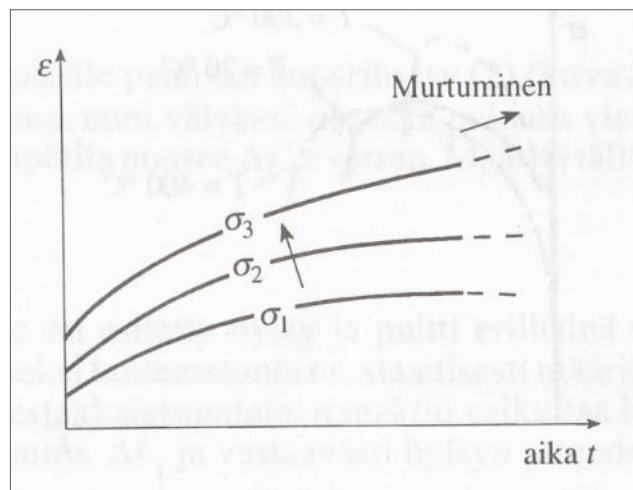
Durablanket Z			
Typical Chemical Analysis (wt.%)			
SiO <sub>2</sub>	52.0 - 56.0		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.0 - 32.0		
ZrO <sub>2</sub>	14.0 - 18.0		
Alkalis	<0.25		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	<0.2		
Physical Properties			
Colour	White		
Classification Temperature (°C) *	1400		
Melting Point (°C)	1740		
Mean Fibre Diameter (microns)	3.25		
Specific Heat at 1000°C (J/kgK)	1035		
Permanent Linear Shrinkage (%) 24 hour soak			
1400 °C	2.7		
Density (kg/m <sup>3</sup> )	96	128	160
Thermal Conductivity (W/mK)			
Mean Temp.			
800 °C	0.24	0.19	0.18
1000 °C	0.34	0.27	0.25
1200 °C	0.44	0.36	0.33
Tensile Strength (kPa)			
	70	90	110

## 2.3 Viruminen

Monien aineiden venymä kasvaa ajan funktiona kuormituksen säilyessä vakiona. Näin tapahtuu eräille aineille jo huoneenlämpötilassa, esimerkiksi eräille muoveille. Kun metalliin kohdistuva lämpötila ja jännitys ovat tarpeeksi korkeat, metallissa alkaa esiintyä viskoplastisia ajasta riippuvia muodonmuutoksia eli virumista. Toisin sanoen viruminen on sitä, että kappale ei palaa täysin alkuperäiseen muotoonsa esimerkiksi venyttävän jännityksen jälkeen. [3]

Mitä korkeampi lämpötila on jännityksen yhteydessä, sitä voimakkaampaa viruminen on [26]. Virumisen muodonmuutosmekanismeja on kolme: dislokaatioliike, diffuusio ja raerajaliukuminen [26]. Metallisille aineille virumista esiintyy eritoten korkeammissa lämpötiloissa [3]. Normaalilämpötiloissa teräsrakenteiden viruminen on pientä, ja se voidaan jättää huomioimatta [3]. Kun lämpötila on yli 500 °C, teräksen viruma tulee merkittäväksi.

Kuvassa 2.24 viruminen on esitetty kaaviomaisesti, kun lämpötila  $T$  on vakio. Viruminen voi myös johtua muista tekijöistä, esimerkiksi puurakenteissa virumisen aiheuttaa kosteuden muuttuminen yhdessä kuormien kanssa. [3]



**Kuva 2.24.** Viruminen eri jännitysten arvoilla lämpötilan ollessa vakio [3].

Taulukkoon 2.15 on koottu erilaisten metallien ja metalliseosten lämpötiloja, joissa viruminen tulee merkittäväksi.

**Taulukko 2.15.** Approksimatiiviset lämpötilat, joissa viruminen tulee merkittäväksi erilaisille metalleille ja seoksille [27].

Materiaalityyppi	Lämpötila, jossa viruminen tulee merkittäväksi [°C]
Alumiiniseokset	205
Titaaniseokset	315
Niukkaseosteiset teräkset	370
Austeniittiset korkean lämpötilan seokset	540
Nikkeli- ja kobolttipohjaiset superseokset	650
Korkeassa lämpötilassa sulavat metallit	980-1540

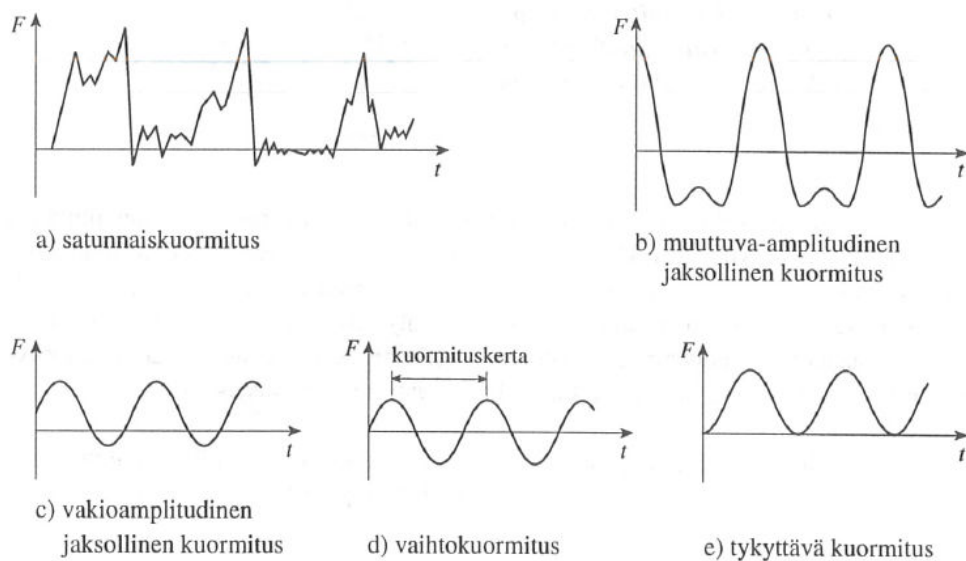
## 2.4 Väsyminen

Kun rakennetta kuormitetaan vaihtelevalla, sykklisellä kuormituksella, sen materiaaliin syntyy väsymisvaurioita. Väsymisvaurio alkaa kerääntyä yleensä mikroskooppisen materiaaliyvian ympärille. [28]

Kuormituksen kestäessä mikroskooppiset materiaaliyviat yhdistyvät makroskooppiseksi alkusäröksi. Alkusärön kriteerinä voidaan pitää sitä, että se on nähtävissä paljain silmin. Alkusärön tyypillisenä pituutena voidaan pitää suuruusluokkaa 0,1 mm olevaa säröä. Kuormituksen yhä jatkuessa makroskooppinen alkusärö alkaa kasvaa, kunnes se saavuttaa sellaisen kriittisen pituuden, jossa särö kasvaa läpi koko rakenneosan yhden kuormitussyklin aikana aiheuttaen rakenneosan murtumisen. Makrosärön kasvaminen sekä kappaleen lopullinen murtuminen noudattavat murtumismekaniikassa johdettuja malleja ja lakeja. Väsymisilmiö voidaan jakaa karkeasti kahteen vaiheeseen, alkusärön syntyymiseen ja syntyneen särön kasvamiseen. [28]

Lämpötila pienentää väsymislujuutta, ja sillä alkaa olla merkitystä kun lämpötila on noin 30 – 40 % materiaalin sulamispisteestä [29]. Väsymisvaurio aiheutuu aina toistuvasta, plastisesta muodonmuutoksesta [28]. Pelkkä lämpörasitus ei väsytä rakennetta, jos rakenne pääsee vapaasti laajenemaan ja kutistumaan lämpötilan vaihtelun mukaan [30]. Jos rakenne ei pääse vapaasti muuttamaan muotoaan lämpötilan mukaan, voi väsymistä esiintyä [30].

Perinteinen väsymislaskenta perustuu täysin koetuloksiin, ja niiden avulla estimoidaan rakenteen kokonaiselinikää, eli sitä kuormitussykliä määrää, joka aiheuttaa alun perin täysin ehjän rakenteen murtumisen [28]. Jos kuormitustasot ovat korkeita, syntyy plastista muodonmuutosta laajalle alueelle, jolloin väsymisvaurio etenee nopeasti, ja vastaavasti rakenneosan elinikäkin laskee [28]. Kuvassa 2.25 on esitetty erilaisia väsymistä aiheuttavia kuormitusfunktioita.



**Kuva 2.25.** Erilaisia kuormitusfunktioita [3].

## 2.5 Lämpötilan vaikutus rakenteiden muodonmuutoksiin ja jännityksiin

Kappaleen lämpötilan muuttuessa kappaleen dimensiot muuttuvat tietyn määrän. Muutoksen suuruuden määrää aineen lämpöpitenemiskerroin  $\alpha$ . Rakenteen lämpötilan kasvaessa rakenne laajenee ja lämpötilan laskiessa rakenne kutistuu. [3]

Jos rakenteen pintojen välille muodostuu lämpötilaeroja, rakenne pyrkii käyristymään. Lämpiviä pintoja laajenee aiheuttaen vetojännitystä, ja viilenevä pinta kutistuu aiheuttaen puristusjännitystä. Lämpötilan muutoksesta aiheutuvat rakenteen muodonmuutokset muodostavat rakenteeseen jännityksiä. Jännitysten syntymiseen vaikuttaa lämpötilan lisäksi rakennemalli sekä materiaalin lämpöpitenemiskerroin. Jännitykset voivat olla korkeissa lämpötiloissa erittäin merkittäviä. Jos lämpötilan muutokset tulevat olemaan suunniteltavassa rakenteessa suuria, pitää ne huomioida rakennesuunnittelussa. Lämpövaikutusten huomiotta jättäminen suunnitteluvaiheessa voi näkyä myöhemmin rakenteessa rakenneaurioiden, rakenteen suunnitellun käyttöiän lyhenemisenä, ja pahimmillaan rakenne voi murtua.

Korkeisiin lämpötiloihin sijoittuvien rakenteiden suunnittelussa pyritään siihen, että rakenteet ovat staattisesti määrättyjä. Staattisesti määrättyihin rakenteisiin syntyy vähemmän hallitsemattomia lämpölaajenemisesta aiheutuvia jännityksiä kuin staattisesti määräämättömiin, jos rakenne pääsee vapaasti liikkumaan. Rakenteiden suunnittelussa pitää pyrkiä myös siihen, että rakenneosat pääsevät vapaasti laajenemaan ja kutistumaan muodonmuutosten mukaisesti.

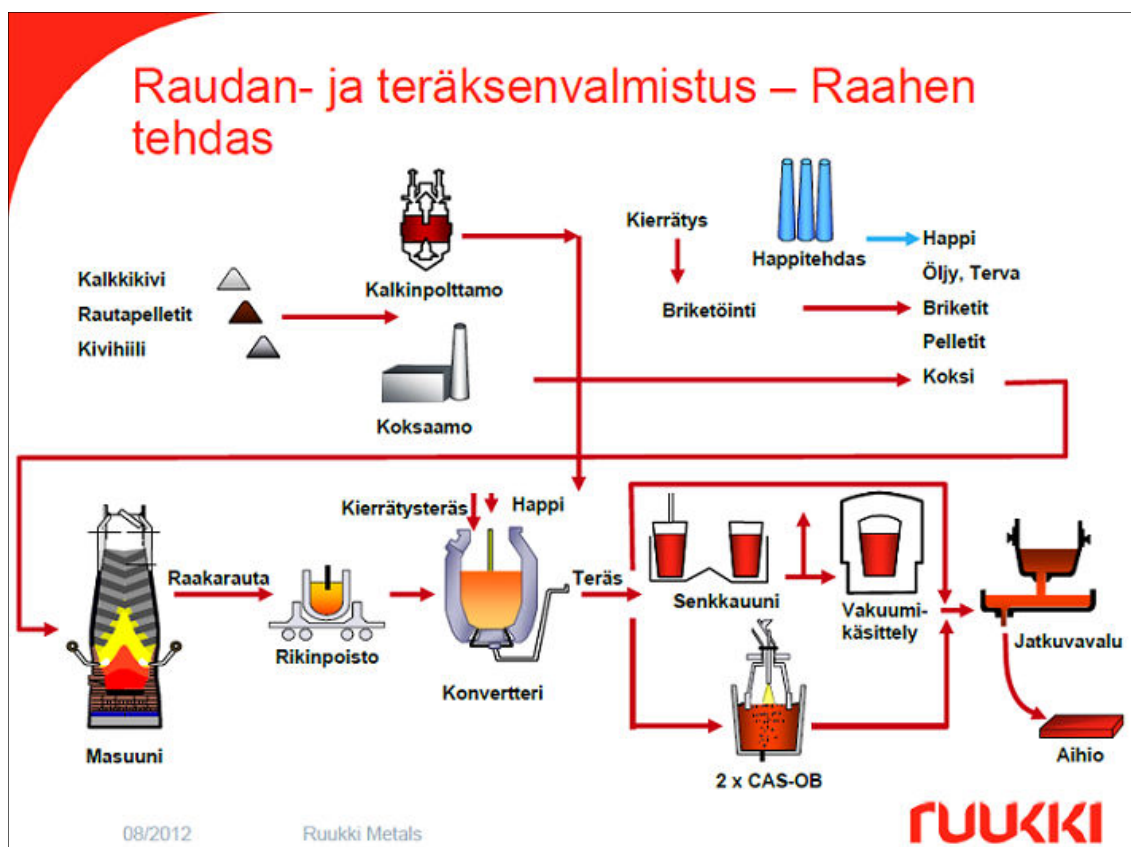
Lämpölaajenemisesta aiheutuvia jännityksiä ovat taivutusjännitys, normaalijännitys ja leikkausjännitys. Suunnittelutyössä jännityksiä analysoidaan elementtimenetelmään pohjautuvilla laskentaohjelmilla ja rakenteiden mitoitus tapahtuu Eurokoodistandardien mukaisesti.

### 3 TARKASTELTAVAT CASE-KOHTTEET

Tässä luvussa on kuvailtu teräksen valmistus case-kohteissa, eli Rautaruukin Raahen sekä Outokummun Tornion terästehtaissa. Myös case-kohteiden lämpöolosuhteet sekä kuumuudelle alttiina olevat rakenteet ja materiaalit on esitetty tässä luvussa.

### 3.1 Teräksen valmistus Rautaruukin Raahen terästehtaal- la

Rautaruukin Raahan terästehtaalla valmistetaan rakenneterästä. Raudan ja teräsaihioiden valmistusprosessi on esitetty kuvassa 3.1.



**Kuva 3.1.** Raudan- ja teräksen valmistusprosessi Rautaruukin Raahen terästehtaalla [31].

Tuotantoprosessin pääraaka-aineena käytetään tehtaalle tuotavia sintrattuja rautapellettejä. Tuotantoprosessin raaka-aineena käytetään myös briketöintilaitoksessa valmistettavia brikettejä hyödyntäen tehtaan tuotantoprosessin eri vaiheissa syntyviä rautarikkaita ja haitta-ainepitoisuuksiltaan alhaisia raaka-aineita. Tehtaan yhteydessä on Nordkalkin kalkkitehdas, jossa valmistetaan poltettua kalkkia. Sitä tarvitaan konvertteriprosessissa



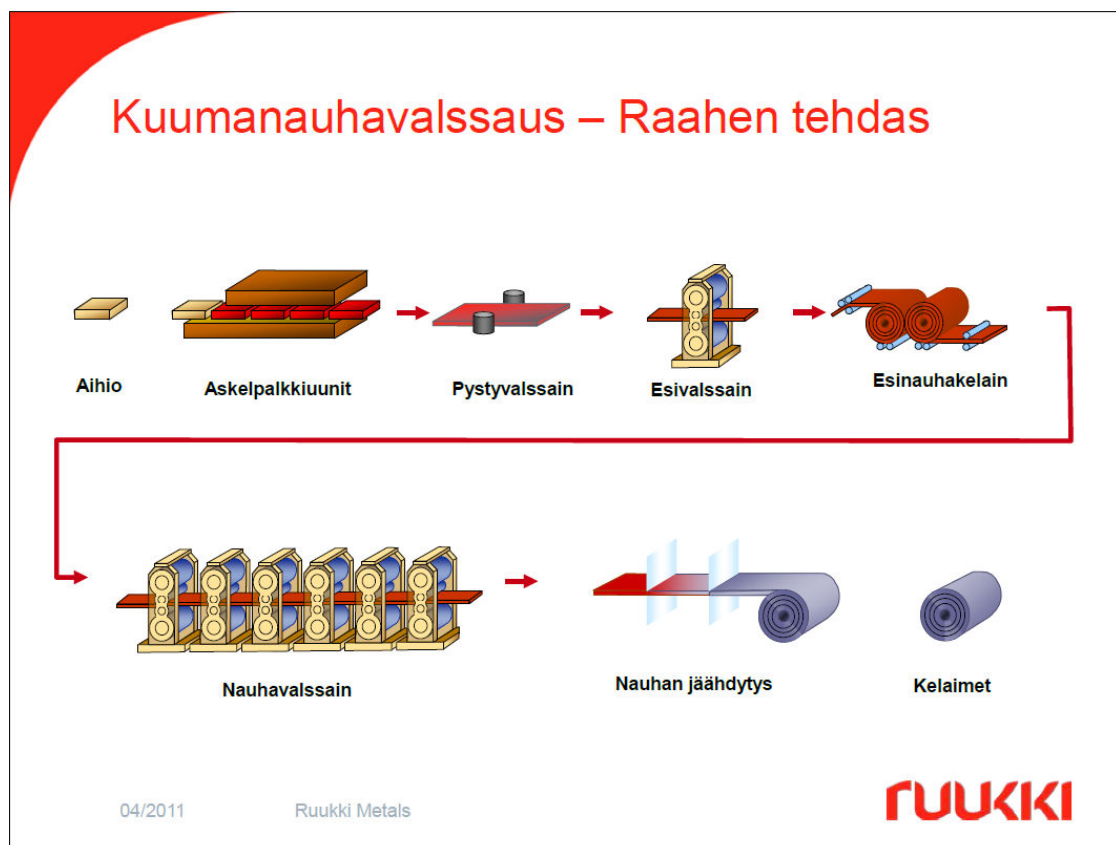
sekä rikin ja muiden haitallisten komponenttien poistamisessa raakaraudasta ja teräksestä. Koksaaamalla kivihiilestä valmistetaan koksia.

Rautapelletit ja brikitit panostetaan masuuniin, joissa niistä valmistetaan raakaraudaa. Valmistusprosessissa käytetään koksia ja raskasta polttoöljyä pelkistämään raudan oksidit raakaraudaksi. Masuunista tulevan raakaraudan sisältämä hiili tekee sen erittäin hauraaksi [18]. Jotta raudasta saadaan terästä, hiilen määrää pienennetään noin 0,1 %:n tasolle [18]. Teräksen ominaisuuksia parannetaan ja muunnellaan pienillä määrillä eri seosaineita [18].

Jotta päästään rakenneterästen edellyttämään hiilipitoisuuteen, hiiltä poistetaan polttamalla, eli suoritetaan mellotus konvertterissa. Tämä tapahtuu puhaltamalla ilmaa sulan raakaraudan läpi. Konvertteriin lisätään myös kierrätysterästä. [18]

Kun panos konvertterissa on valmis, se kaadetaan valusenkkiaan. Valusenkassa sula siirretään edelleen senkkäkäsittelyyn, jossa suoritetaan sulan koostumuksen täsmäys, eli lisätään tarvittavat seosaineet sekä täsmätään lämpötila ennen valua. Mellotuksen jälkeen sulassa teräksessä on ylimääräistä happea, joka jähmettymisen yhteydessä reagoi hiilen kanssa muodostaen hiilimonoksidia, mikä aiheuttaa huokoisuutta teräkseen. Sulassa oleva happi sidotaan tiivistämällä teräs käyttäen seosaineita. Kun täsmäys on tehty, valetaan välisenkan pohjan kautta teräs jatkuvavaluna aihioiksi. [18]

Aihiot jäähdytetään, jonka jälkeen ne viedään kuumavalssaamolle. Siellä aihioista valmistetaan kuumanauhavalssausprosessin kautta teräskeloja (kuva 3.2) tai levyvalssausprosessin kautta teräslevyjä (kuva 3.3).

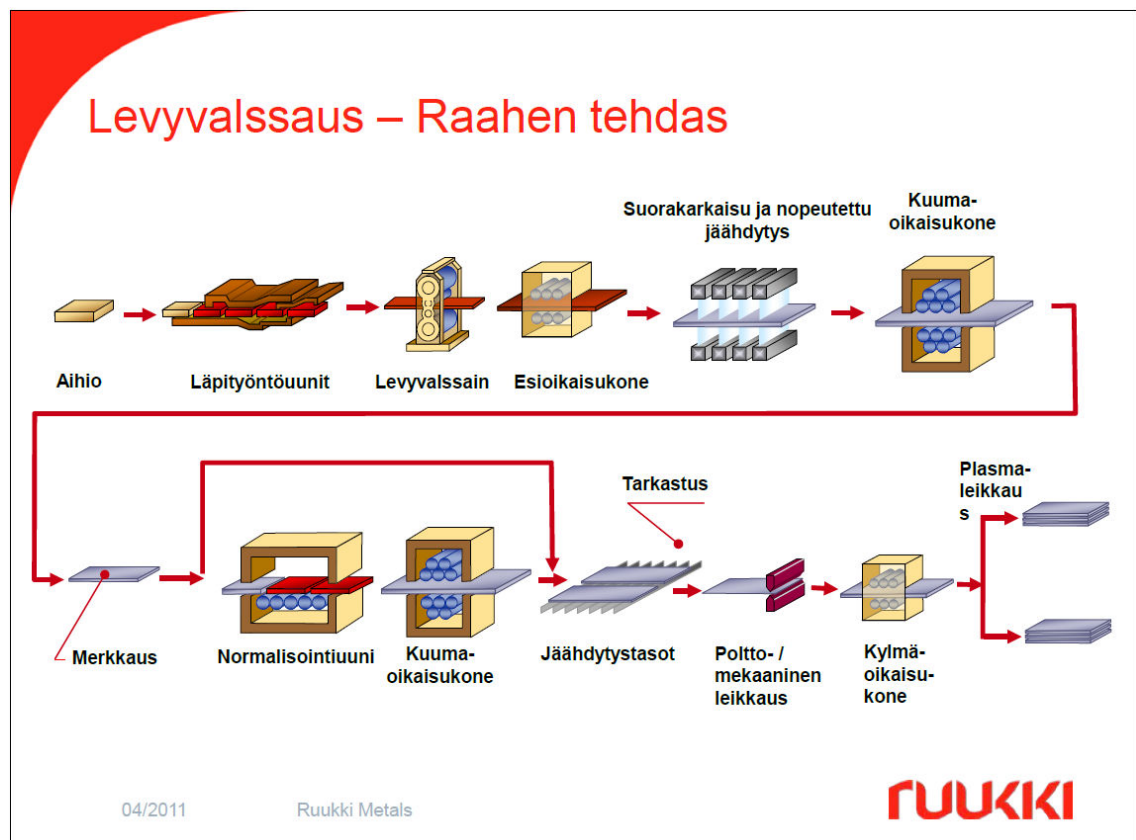


**Kuva 3.2.** Teräskelojen valmistus kuumavalssaamossa [31].



Jäähtyneet aihiot kuumennetaan, jolloin niiden muokkausvastus pienenee ja muodonmuutoskyky suurenee. Kuumanauhavalssausprosessissa aihiot kuumennetaan askelpalkkiuunissa ja levyvalssausprosessissa läpityöntöuunissa.

Kuumanauhavalssausprosessissa aihion pituus kasvaa samalla kun se poikkisuunnassa pakotetaan kulloinkin halutuksi poikkileikkausmuodoksi. Voimakkaan muokkauksen vuoksi tasomaisen valssatun lopputuotteen mekaaniset lujuusominaisuudet poikkeavat jonkin verran toisistaan valssausuunnassa ja sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Useiden välivaiheiden eli valssauksien kautta aihioista työstetään nauhoja, jotka kelataan keloiksi. [18]



**Kuva 3.3.** Teräslevyjen valmistus kuumavalssaamossa [31].

### 3.2 Teräksen valmistus Outokummun Tornion terästehtaalla

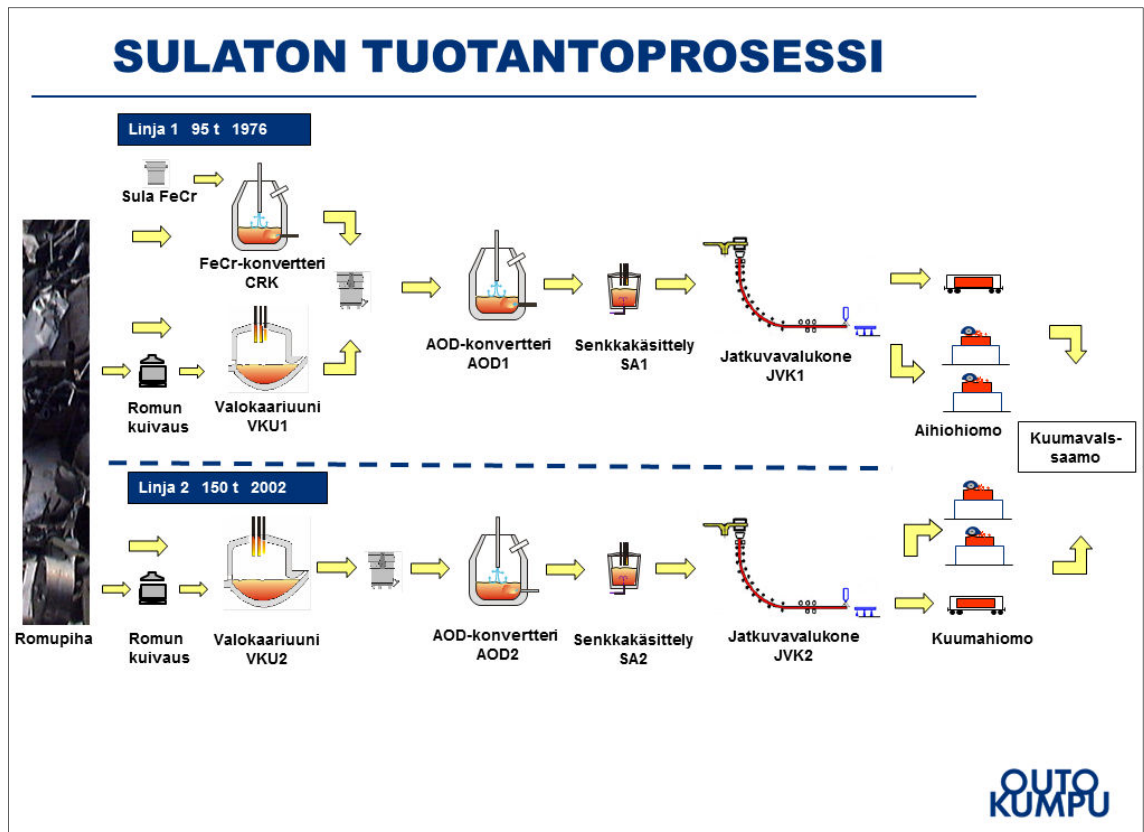
Outokummun Tornion terästehtaalla valmistetaan austeniittista ja ferriittistä kuuma- ja kylmävalssattua ruostumatonta terästä. Lopputuotteet ovat mustat kuumanauhat, kirkaat kuumatuotteet sekä kylmävalssatut nauhat ja levyt.

Teräksen valmistuksen pääraaka-aineena käytetään kierrätysterästä. Raaka-aineina käytetään suuria määriä myös ferrokromia ja muita ferroseoksia sekä nikkeliä.

Teräksen valmistuksessa tarvittava ferrokromi tuotetaan Outokummun Tornion ferrokromitehtaalla. Ferrokromia valmistetaan tehtaalla kahdessa vanhassa sekä yhdessä

juuri käyttöön otetussa uppokaariperiaatteella toimivassa sähköuunissa. Tehdas käyttää pääraaka-aineena Kemin kaivoksella tuotettavaa kromiittirikastetta.

Outokummun Tornion terästehtaan terässulatossa on kaksi aihiodien tuotantolinjaa. Molempien linjojen tuotantoprosessi menee läpi 20 kertaa vuorokaudessa, jos vuorokauden aikana ei ole tuotantokatkoja. Linjalla 1 prosessissa kerralla käsiteltävän sulan teräksen eli panoksen paino on 95 t ja linjalla 2 se on 150 t. Sulaton tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 3.4.



**Kuva 3.4.** Ruostumattoman teräksen valmistus Outokummun Tornion terästehtaalla [32].

Ensiksi tehtaan raaka-ainepihalta kerätty kierrätysteräs kuivatetaan. Sen jälkeen linjalla 1 musta kierrätysteräs siirretään yhdessä koksien, kalkin ja muiden seosaineiden kanssa valokaariuuniin, jossa se sulatetaan. Samanaikaisesti kun kierrätysterästä sulatetaan valokaariuuneissa, käsitellään ferrokromitehtaalta saatavaa ferrokromisulaa ferrokromikonvertterissa. Käsitelty ferrokromisula panostetaan siirtosenkkaan, johon kaadetaan myös valokaariuunissa sulatettu kierrätysteräs. Konvertoitu ferrokromisula ja valokaariuunin sula muodostavat yhdessä sulan raakateräksen eli AOD (Argon-Oxygen-Decarburisation) -konvertterin lähtösulan, joka panostetaan AOD-konvertteriin siirtosenkasta.

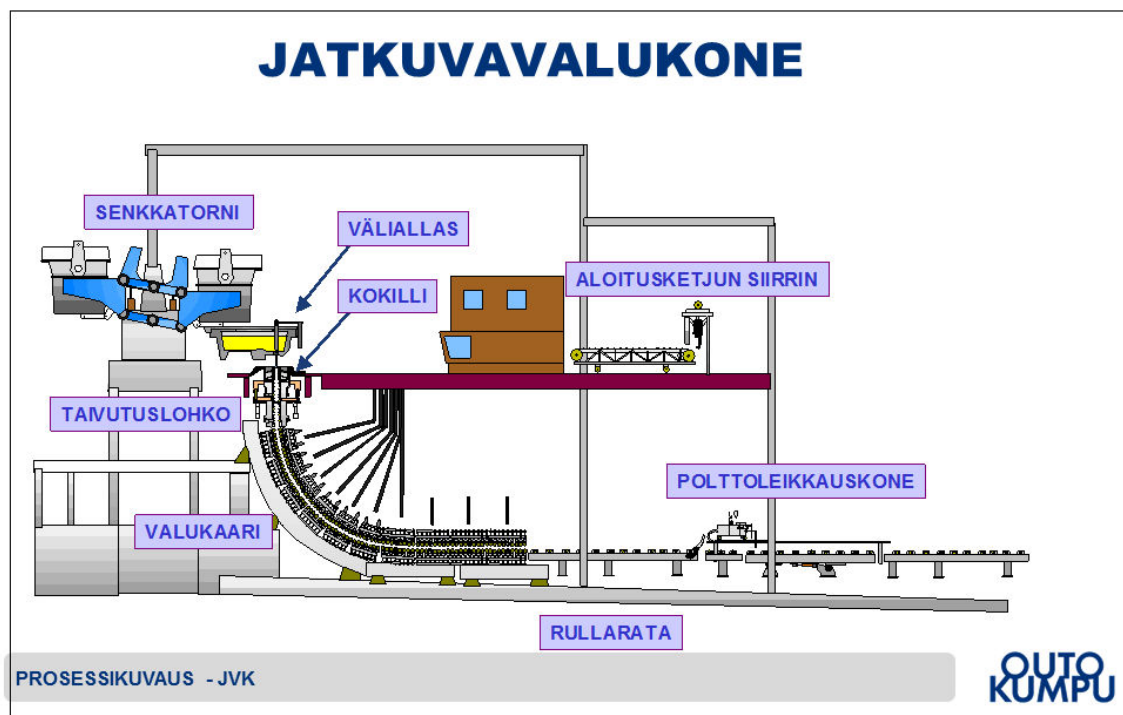
Linjalla 2 AOD-konvertterin lähtöpanos saadaan suoraan valokaariuuni 2:lta, eikä prosessiin lisätä ferrokromia lainkaan. Linjalla 2 käytettävä kierrätysteräs on ruostumatonta terästä.

AOD-konvertteri on ruostumattoman teräksen valmistuksen ydinprosessi, jossa suoritetaan teräksen mellotus. AOD-konvertterin rakenne koostuu teräsmanttelista, jonka sisäpinnalla on tulenkestävä tiilivuoraus. Prosessikaasut johdetaan sulapanostukseen konvertterin alaosaan sijoitettujen suuttimien kautta. Mellotus AOD-konvertterissa tapahtuu hapen ja inertin kaasun (argon tai typpi) seoksella. Mellotuksessa kromia suojataan hapettumiselta inertin kaasun avulla, ja happi ohjataan nimenomaan hiilen polttoon. [18]

Mellotuksen lisäksi AOD-konvertterissa täsmätään seosaine- ja jäähdytysmateriaalien lisäyksillä terästen koostumus ja lämpötila halutulle tasolle. AOD-konvertterista sulateräs kaadetaan valusenkkään ja siirretään edelleen senkkakäsittelyyn. [18]

Senkkakäsittelyssä sulaterästä sekoitetaan, seostetaan ja kuumennetaan. Sulateräksestä myös otetaan näytteitä, mitataan lämpötilaa ja poistetaan kuonaa. Senkkakäsittelyn jälkeen teräs tuodaan jälkivalukoneelle valusenkassa. Teräs ohjataan valusenkan pohjan kautta välialtaaseen ja siitä edelleen kokilliin. Kokillissa alkaa sulan jähmettyminen aihiksi. [18]

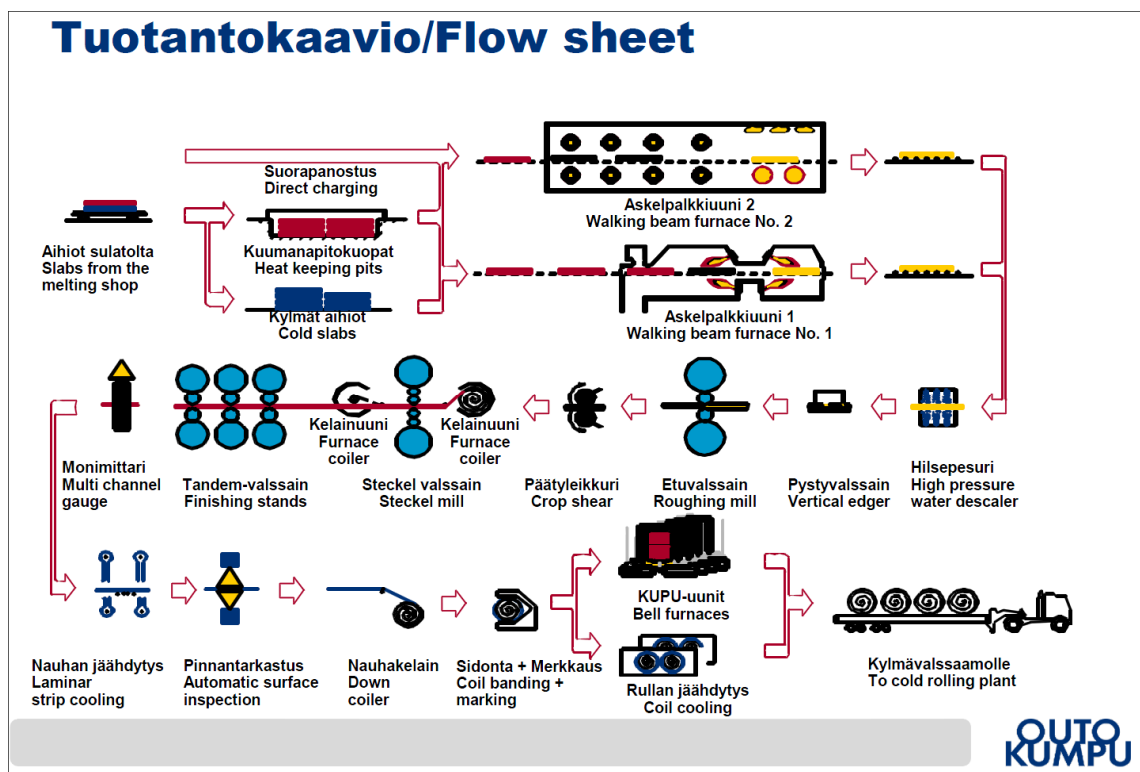
Jatkuvavalun aikana valukaarella valunauha jähmettyy edelleen jäähdytyksen ansiosta. Valu kestää 60–480 minuuttia riippuen valuun sisältyvien senkkojen lukumäärästä. Valettava aihio katkaistaan polttoleikkaamalla 10–15 minuutin välein riippuen aihion pituudesta ja valunopeudesta. Jatkuvavalukone ja sen osat on esitetty kuvassa 3.5.



Kuva 3.5. Jatkuvavalukoneen osat [32].

Valettavien aihioden paksuus on 167 mm, leveys 1028–1610 mm sekä pituus maksimissaan 14 m ja minimissään 5,5 m. Aihiot ovat pääasiassa suoraan valmiita kuumavalssattaviksi. Osa aihioista kuljetetaan hiomolle aihiohiontaan aihioden pinnassa esiintyvien pintavikojen vuoksi [18].

Sulatossa valmistetut raaka-aihiot viedään kuumavalssaamolle rullaratoja pitkin, josta ne panostetaan joko suoraan askelpalkkiuuniin tai lämpöeristettyyn välivarastoon. Osa aihioista tulee kylminä. Askelpalkkiuunissa aihiot kuumennetaan. Uunin polttoaineena käytetään ferrokromitehtaalla talteen otettua häkäkaasua ja/tai propaania. Uunista aihiot nostetaan rullaradalle ja kuljetetaan hilsepesun jälkeen ensin pystyvalssaimelle, tämän jälkeen etuvalssaimelle ja sitten Steckel-tyyppiselle nauhavalssaimelle. Vals-saimilla aihiot valssataan mustiksi kuumanauhoiksi. Mustat kuumanauhat jäähdytetään ja kelataan rulliksi. Kuumavalssaamon tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6. Teräsrullien valmistus kuumavalssaamossa [32].

Kuumavalssaamossa työstetään vuorokaudessa 150–200 teräsaihiota. Prosessissa käsitellään kerrallaan yhtä tai kahta ahiota. Yhden aihion paino on 25 t. Aihion leveys on leveysluokasta riippuen 1050 mm, 1250 mm tai 1500 mm. Aihioista valmistettavan mustan kuumanauhan paksuus on 2,5–12,7 mm.

Kuumavalssaamolta jäähtyneet mustat kuumanauharullat kuljetetaan kylmävalssaamolle jatkokäsittelyyn ja edelleen myyntiin kirkkaina kuumanauhoina putkitehtaille ja jakelijoille.

### 3.3 Lämpöolosuhteet case-kohteissa

Teräksen valmistusprosessissa vapautuu suuri määrä lämpöenergiaa. Tämä johtuu siitä, että teräksen lämpötila on monissa valmistusprosessin vaiheissa korkea ja terästä käsitellään suuria määriä kerralla. Lämpö siirtyy teräksestä pääosin säteilemällä, mutta myös johtumalla ja konvektion kautta. Lämpörasitusta aiheuttaa rakenteille myös prosessilaitteistosta lentävä kuuma teräsroiske. Vapautuva lämpöenergia kuumentaa monissa teräksen valmistusprosessin vaiheissa tehtaan rakenteita. Myös lämpötilan vaihtelu prosessien välissä on merkittävä rasitus rakenteille.

Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tarkemmin lämpöolosuhteita Rautaruukin Raahen sekä Outokummun Tornion terästehtailla. Kappaleissa 3.3.1 ja 3.3.2 sekä niiden alakappaleissa selostetut tehtaiden rakenteiden lämpötila-arvot ovat tehdaskierroksien yhteydessä paikan päällä digitaalisella infrapunälämpömittarilla mitattuja arvoja. Tämän takia kyseiset lämpötila-arvot ovat karkeita, mutta suuntaa-antavia.

#### 3.3.1 Lämpöolosuhteet Rautaruukin Raahen terästehtaalla

Raahen tehtaalla teräksen tuotantoprosessista vapautuu lämpöenergiaa voimakkaasti koksaamossa, masuunissa, terässulatossa, jäädytyshallissa ja kuumavalssaamossa. Koksaamon ja masuunin lämpöolosuhteita ei tässä tutkimuksessa tarkastella, koska ne on rajattu pois.

Terässulatossa teräksen tuotantoprosessi menee läpi 36 kertaa vuorokaudessa. Sulaton prosessilaitteiston läheisyydessä sijaitsevien rakenteiden lämpeneminen alkaa, kun prosessi käynnistyy. Prosessin päätyttyä alkavat rakenteet jäähtyä, ja tämä jatkuu siihen asti, kunnes prosessi käynnistyy uudelleen. Terässulatossa tuotantoprosessi kuumentaa tehtaan rakenteita erityisesti konvertterin, senkkauunin ja jatkuvavalukoneen läheisyydessä.

Kuumavalssaamalla sekä kuumanauhavalssausprosessissa että levyvalssausprosessissa valssataan noin 350 aihioita vuorokaudessa. Myös kuumavalssaamon tuotantolinjastojen läheisyydessä sijaitsevat rakenteet lämpenevät prosessin aikana ja jäähtyvät siihen asti, kunnes prosessi alkaa seuraavan kerran.

Tehtaalla ei ole säännöllistä viikoittaista huoltoseisokkia. Vuosittain pidetään yleensä yksi huoltoseisokki, jonka kesto on yhden ja kahden viikon välillä. Huoltolojin rakenteiden lämpötila laskee pienemmäksi verrattuna tuotantoaikaiseen lämpötilaan.

Tehtaalla ilman lämpötila lämmölle altistuvien rakenteiden läheisyydessä on pääsääntöisesti alle 50 °C. Merkittävin tehtaan rakenteita kuumentava lämpöenergian muoto on lämpösäteily.

##### 3.3.1.1 Lämpöolosuhteet terässulaton konvertterin läheisyydessä

Merkittävä määrä lämpöenergiaa vapautuu, kun konvertteriin kaadetaan teräsosan senkasta. Prosessin sijoittuminen tehtaan terästuotannossa on esitetty kuvassa 3.1.

Prosessissa roiskuu ajoittain terässulaa tehtaan betonilattialle (kuva 3.7). Teräsroiskeen lämpötila on noin 1500 °C. Teräsroiske kuumentaa voimakkaasti betonilaattaa,

ja lämpö siirtyy johtumalla, sillä roiske on laatassa kiinni. Laattaan kohdistuu lisäksi mekaanista rasitusta, kun jäähtynyt roiske poistetaan laatasta.

Konvertteriin lisätään prosessissa myös kierrätysterästä. Jos kierrätysteräksestä ei ole ennen lisääystä riittävästi kuivatettu siinä kulkeutuvaa vettä, voi kierrätysteräksen lisäys konvertteriin aiheuttaa höyryräjähdyksiä. Tämä on riskinä erityisesti talviaikaan jolloin kierrätysteräksen mukana kulkeutuu lunta ja jäätä. Höyryräjähdysten vaikutuksesta voi konvertterista lentää terässulaa konvertterin ympäristössä sijaitseviin tehtaan rakenteisiin. Konvertterin läheisyydessä sijaitsevan valvomon ikkunat voivat voimakkaan höyryräjähdysten vaikutuksesta rikkoutua. Valvomon ikkunoita joudutaan uusimaan höyryräjähdysten takia vuosittain.

Räjähdys voi nostattaa pölypilven, jolloin näkyvyys alueella häviää. Tällöin tehdään turvallisuussääntöjen mukaan alueella olevien ihmisten pitää olla liikkumatta siihen asti kunnes näkyvyys palautuu.



**Kuva 3.7.** Teräspanoksen kaato senkasta konvertteriin [31].

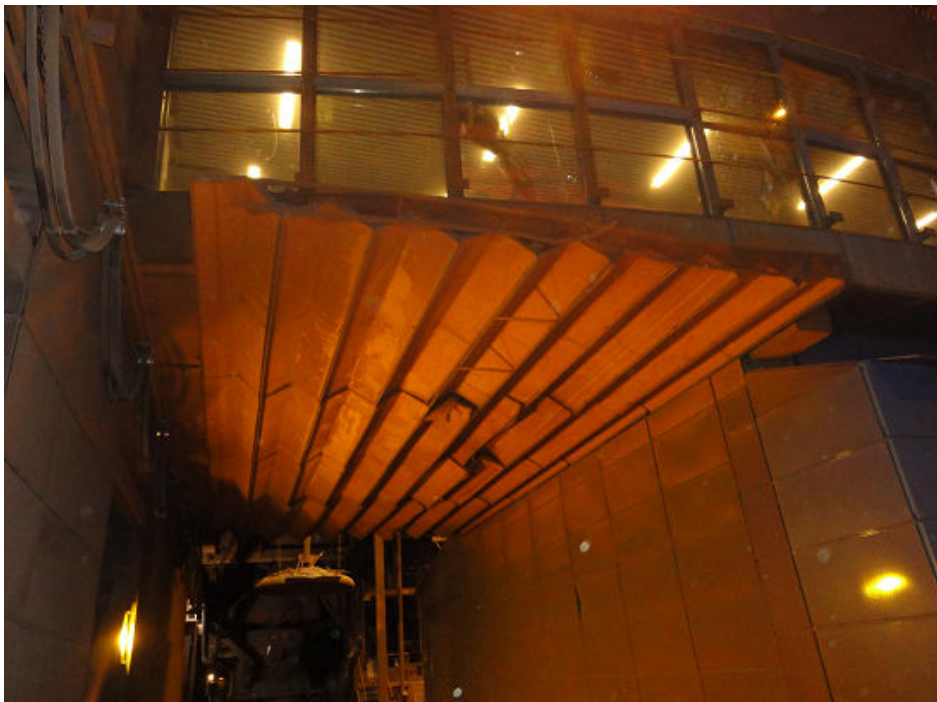


### 3.3.1.2 Lämpöolosuhteet terässulaton senkkauunin läheisyydessä

Kuvassa 3.8 lämmönsuojauslevyillä suojatut rakenteet kuumenevat, kun valusenkka on senkkauunissa. Prosessin sijoittuminen tehtaan terästuotannossa on esitetty kuvassa 3.1.

Valusenkan päällä on kansi, mutta kannen raosta säteilee lämpöä. Myös valusenkka itsessään säteilee lämpöä, sillä valusenkan ulkopinnan lämpötila nousee noin 1500 °C lämpöisen teräsosan vaikutuksesta.

Kuvassa 3.8 näkyvät valvomon rakenteita suojaavat keraamiset lämmönsuojauslevyt. Suojaus estää valvomon rakenteiden kuumenemisen sekä ikkunalasien sulamisen, jos senkka häiriötilanteessa pysähtyy valvomon alle.

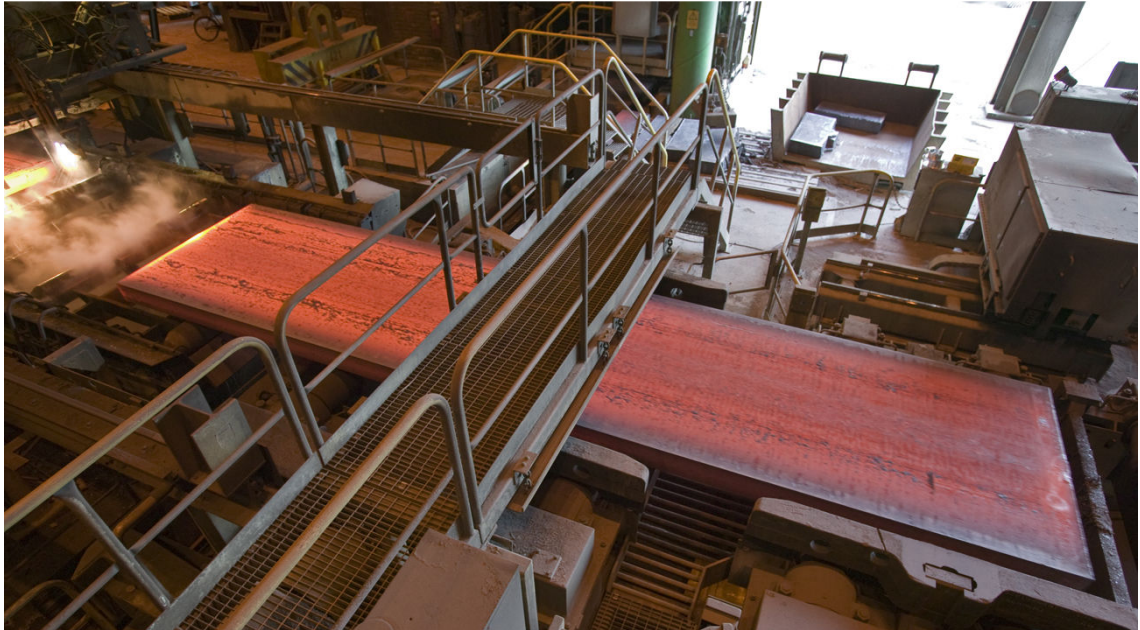


*Kuva 3.8. Valvomoa suojaavat keraamiset lämmönsuojauslevyt [31].*

### 3.3.1.3 Lämpöolosuhteet terässulaton jatkuvavalukoneen läheisyydessä

Kun raaka-aihi liikkuu rullaradalla, siitä säteilee lämpöä ympäröiviin rakenteisiin. Aihion lämpötila on 850 °C, kun se valetaan jatkuvavaluna ahiiksi. Prosessin sijoittuminen tehtaan terästuotannossa on esitetty kuvassa 3.1.

Muutaman metrin etäisyydellä rullaradasta sijaitsevien suojaamattomien rakenteiden pintalämpötila nousee arvoon 100–300 °C. Kuvassa 3.9 näkyy teräsrakenteinen kulkusilta, joka lämpösäteilyn vaikutuksesta kuumenee voimakkaasti.



*Kuva 3.9. Kuuma teräsaihiö tulossa rullarataa pitkin jatkuvavalukoneelta [31].*

#### 3.3.1.4 Lämpöolosuhteet jäähdytyshallissa raaka-aihioiden säilytyspaikan läheisyydessä

Tehtaalla on käytössä kaksi jäähdytyshallia, joissa jäähdytetään jatkuvavalukoneilla valettuja raaka-aihioita. Aihioita säilytetään pinoissa, ja niiden lämpötila on 20–800 °C. Jäähdytyshallissa 1 aihioita on 300–400 kappaletta ja jäähdytyshallissa 2 aihioita on 400–500 kappaletta. Etäisyys pinoista jäähdytyshallin rakenteisiin on muutamia metrejä.

#### 3.3.1.5 Lämpöolosuhteet kuumavalssaamon askelpalkkiuunin läheisyydessä

Aihion lämpötila askelpalkkiuunissa on korkeimmillaan 1300 °C. Aihion tullessa uunista siitä säteilee lämpöä rullaradan rullien välistä alapuolisiin perusrakenteisiin. Rakenteet ovat noin 0,7 m:n etäisyydellä rullista ja ne joutuvat erittäin suuren lämpörasituksen kohteeksi.

Rullaradalla aihio pääsee säteilemään vapaasti suoraan sivuille sekä ylös. Osalla rullaradasta on sivulaidat, jotka vähentävät rakenteisiin kohdistuvan sivusuuntaisen lämpösäteilyn määrää. Hallin seinärakenteet ovat noin 10 m:n etäisyydellä ahiosta, mutta lähempänä on muutamia betoni- ja teräsrakenteita. Kuvassa 3.10 näkyy askelpalkkiuuni ja rullarata.





*Kuva 3.10. Askelpalkkiuuni ja rullarata [31].*

### 3.3.1.6 Lämpöolosuhteet kuumavalssaamon kuumanauhavalssausprosessissa

Kun aihio siirretään askelpalkkiuunista aihioradalle, on sen lämpötila 1000–1100 °C. Kuumaa aihiota työstetään aihioradalla. Työstön aikana aihio on monissa prosessien vaiheissa suojaamattomana, jolloin siitä säteilee lämpöä tehtaan rakenteisiin. Pystyvalssausprosessissa aihioista lähtevä lämpösäteily nostaa noin kahdeksan metrin etäisyydellä aihion yläpuolella sijaitsevan teräksisen kattoristikon alapaarteen pintalämpötilan noin 150 °C:n arvoon.

Kuvassa 3.11 on esitetty nauha, kun se on työstettävänä pystyvalssaimella, jolloin sen pituus on noin 100 m. Nauhan lämpötila on noin 900 °C. Kuvassa 3.2 on esitetty prosessin sijoittuminen tehtaan terästuotannossa.



*Kuva 3.11. Kuuma teräsnauha työstettävänä pystyvalssaimella [31].*

Kuvassa 3.12 on esitetty nauhan työstöä esinauhakelaimella. Nauhan lämpötila on noin 900 °C. Kuvassa 3.2 on esitetty prosessin sijoittuminen tehtaan terästuotannossa.



*Kuva 3.11. Kuuma teräsnauha esinauhakelaimella [31].*

#### **3.3.1.7 Lämpöolosuhteet kuumavalssaamon aihioratojen läheisyydessä levyvalssauserossissa**

Levyvalssauserossissa aihoiden lämpötila on läpityöntöuneilla noin 1250 °C, levyvalssaimella noin 1100 °C ja jäähdystasoille tullessa noin 1000 °C. Jäähdystasoilla aihiot jäähdytetään alle 150 °C lämpötilaan.

Levyvalssauserossin alkupäässä aihioradassa on sivulaidat, jotka vähentävät rakenteisiin kohdistuvan sivusuuntaisen lämpösäteilyn määrää. Aihioista pääsee säteilemään lämpöä runsaasti yläviistoon ja ylös.

#### **3.3.1.8 Lämpöolosuhteet kuumavalssaamon kelakuljettimien läheisyydessä**

Kelojen lämpötila on korkeimmillaan noin 900 °C. Kelojen vieressä sivuilla ja yläpuolella on betoni- ja teräsrakenteita lähimmillään noin 1 m:n etäisyydellä. Alapuolella on rakenteita noin 0,5 m:n etäisyydellä. Keloista lähtevä lämpösäteily kuumentaa rakenteita voimakkaasti.

### 3.3.2 Lämpöolosuhteet Outokummun Tornion terästehtaalla

Tornion terästehtaalla tuotantoprosessissa vapautuu lämpöenergiaa voimakkaasti teräsulatoissa ja kuumavalssaamossa. Myös ferrokromitehtaan sulaton tuotantoprosessissa vapautuu huomattava määrä lämpöenergiaa, erityisesti kolmessa uppokaariperiaatteella toimivassa sähköuunissa. Ferrokromitehtaan lämpöolosuhteita ei tässä työssä tarkastella, koska ne on rajattu pois.

Sulaton rakenteiden lämpeneminen alkaa, kun prosessi käynnistyy. Kun prosessi on mennyt läpi, alkavat rakenteet jäähtyä. Jäähtyminen loppuu, kun prosessi käynnistyy uudelleen. Myös kuumavalssaamossa rakenteet lämpenevät prosessin aikana ja jäähtyvät siihen asti, kun prosessi alkaa seuraavan kerran.

Viikoittain rakenteiden lämpenemistä tauottaa kahdeksan tunnin mittainen huoltoseisokki ja kesäisin yksi pitempiaikaisempi huoltoseisokki. Tehtaalla ilman lämpötila on yleensä 20–40 °C, mutta talvisin voi olla viileämpää riippuen ulkoilman lämpötilasta.

#### 3.3.2.1 Lämpöolosuhteet terässulaton senkkauunissa ja sen läheisyydessä

Sulatossa panoksen lämpötila nostetaan AOD-konvertterissa arvoon 1700 °C. Tämän jälkeen terässula kaadetaan senkkauunissa senkkään (kuva 3.12). Prosessin sijoittuminen tehtaan terästuotannossa on esitetty kuvassa 3.4.



*Kuva 3.12. Teräspanoksen siirto konvertterista siirtosenkkään [32].*



Kaadon aikana lämpösäteily on voimakasta. Säteily kohdistuu pääosin senkkauunin rakenteisiin. Ennen prosessin alkua teräksisen 20 mm:n paksuisen suojalevyn lämpötila on noin 100 °C. Prosessin käynnistyttyä suojalevyn lämpötila alkaa nousta, ja se nousee hetkessä noin 400 °C:n tasolle. Suojalevyä rasittaa myös teräs- ja kuonaroiskeet.

Kaadon jälkeen senkan päälle laitetaan kansi, joka vähentää senkan ympärille lähtevän säteilyn määrää huomattavasti. Kansi ei kuitenkaan ole tiivis, ja kannen raosta säteilevä lämpö kuumentaa senkkauunin rakenteita. Senkka kuljetetaan kiskoja pitkin ulos uunista, ja sieltä tultuaan kannen raosta säteilee lämpöä rakenteisiin (kuva 3.13).



*Kuva 3.13. Ruostumaton teräslevy säteilysuojana [32].*

Kuvassa 3.13 näkyy säteilysuojaksi asennettu ohut ruostumaton teräslevy, joka suojaa portaita ja portailla kulkevia ihmisiä senkan kannen ja senkan välisestä raosta säteilevältä lämmöltä.

### 3.3.2.2 Lämpöolosuhteet terässulaton jatkuvavalukoneen ja rullaradan läheisyydessä

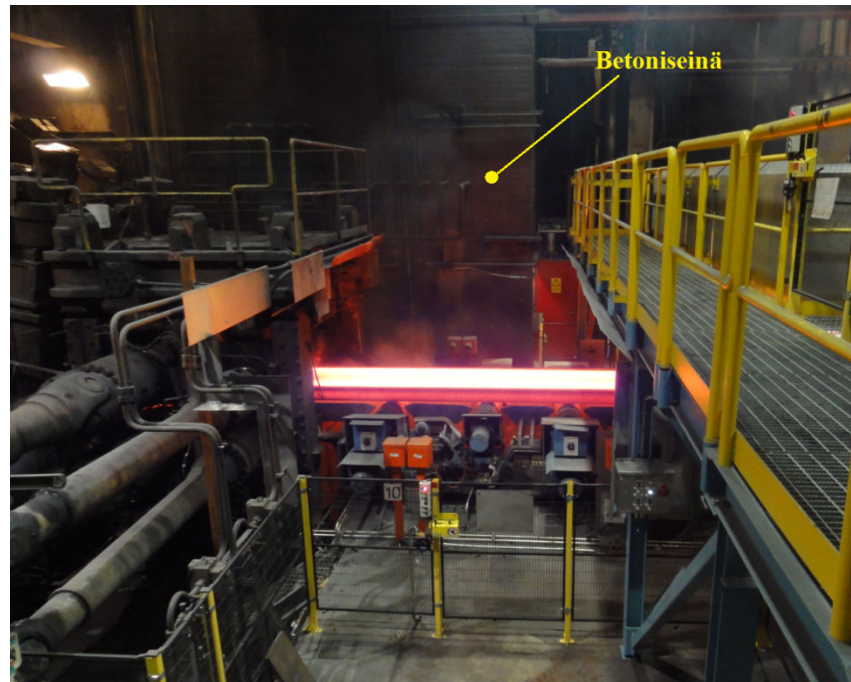
Terässula kuljetetaan senkassa valukoneiden läheisyyteen, ja senkan kansi avataan. Kannen ollessa auki lämpö säteilee voimakkaasti (kuva 3.14).



**Kuva 3.14.** Kannettomasta senkasta lämpö säteilee tehtaan rakenteisiin. Nosturiratapalkkiin on asennettu kuitupohjaisia levyjä säteilysuojaksi [32].

Kannettoman senkan sisällä oleva terässula kuumentaa teräksisen nosturiratapalkin kuumuudensuojana olevia kuitupohjaisia levyjä, nosturiratapalkkia sekä teräksistä runkopilaria. Kuvassa 3.14 näkyy nosturiratapalkin nuolen kohdalla, että yksi uumaa suojaava levy on irronnut. Kyseisessä kohdassa uuman lämpötila nousee hyvin korkealle, sillä uumaa suojaavan levyn pintalämpötila nousee yli 140 °C:n suuruiseksi. Runkopilarin pinta nousee useiden kymmenien celsiusasteiden lämpötilaan, nosturipalkin ylälaipan pinta yli 90 °C:n lämpötilaan sekä nosturipalkin alalaipan suojalevyn pinta yli 300 °C:n lämpötilaan. Osa alalaipan suojana olevista suojalevyistä on käyrästynyt korkean lämpötilan vaikutuksesta.

Terässula kaadetaan jatkuvavalukoneella senkasta välialtaaseen, jolloin lämpösäteily rasittaa kaadon läheisyydessä olevia rakenteita. Välialtaasta teräs muotoutuu jatkuvavaluna raaka-aihioksi. Kuumaa aihiota työstetään rullaradalla, ja se säteilee voimakkaasti lämpöä ympäristössä oleviin rakenteisiin (kuva 3.15). Aihion lämpötila valukaarelta ulos tullessaan on 850 °C.



**Kuva 3.15.** Kuumasta raaka-aihiosta säteilee lämpöä tehtaan rakenteisiin [32].

Kuvassa 3.15 näkyy rullaradan läheisyydessä sijaitseva betoniseinä. Sen lämpötila nurkassa aihion puoleisessa pinnassa nousee prosessin aikana arvoon noin 150 °C ja pintalämpötila seinän toisella puolella arvoon noin 100 °C. Rullaradan läheisyydessä sijaitsevia teräsrakenteita ja putkia on suojattu teräslevyillä.

Betoniseinän lämpötilaa mitattiin tarkemmalla mittauslaitteistolla 23.11.2012. Tuolloin betoniseinän korkein pintalämpötila nurkassa oli 170 °C. Mittauksesta on selostettu luvussa 5.

Raaka-aihiosta lähtevä lämpösäteily nostaa rullaradan läheisyydessä sijaitsevat kulkutason kannatinpilarit yli 200 °C:n lämpötilaan. Rullaradalla liikkuva raaka-aihio, kannatinpilareita sekä kulkutason rakenteita on esitetty kuvassa 3.16.



**Kuva 3.16.** Kuumasta raaka-aihiosta säteilee lämpöä kannatinpilareihin ja kulkutiehen [32].



### 3.3.2.3 Lämpöolosuhteet aihioden säilytyspaikoissa

Aihioita säilytetään kylmäpinoissa ja kuumanapitokuopassa. Kylmäpinoissa aihioden lämpötila on 20–100 °C ja kuumanapitokuopassa 300–700°C. Kylmäpinoissa lämpösäteily on aihioden alhaisen lämpötilan takia varsin pientä. Kuumanapitokuoppa on kannellinen. Kannen ollessa kiinni aihioista lähtevä lämpösäteily kohdistuu pääosin kuumanapitokuopan rakenteisiin. Kannen ollessa auki aihioista säteilee lämpöä tehtaan rakenteisiin. Kuvassa 3.18 on esitetty kuumanapitokuoppa sekä kuuma aihio, jota ollaan siirtämässä kuoppaan.



*Kuva 3.17. Kuuma-aihio siirtymässä kuumanapitokuoppaan [32].*

### 3.3.2.4 Lämpöolosuhteet kuumavalssaamon aihioratojen läheisyydessä

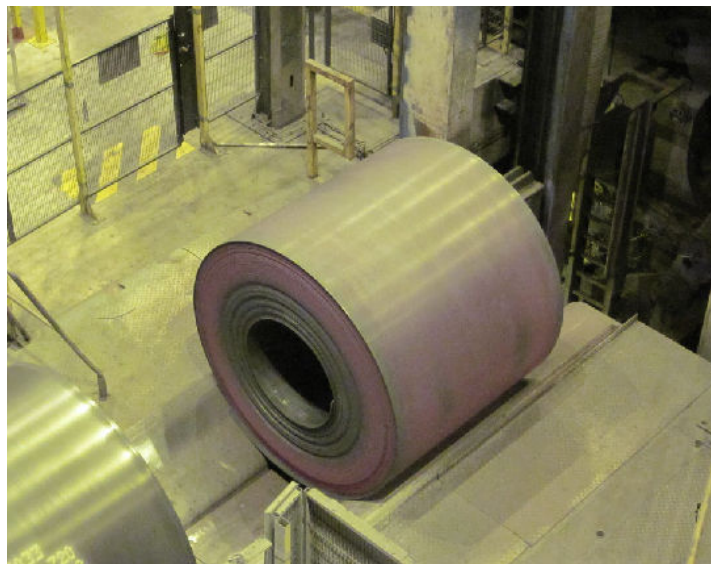
Kuumavalssaamon prosesseissa käsitellään kuumia teräsaihiota. Prosessi toistuu vuorokaudessa noin 75–100 kertaa. Aihion lämpötila on prosessin aikana noin 1000–1100 °C. Aihiot valssataan, jolloin valssauksen seurauksena ne ohenevat ja pitenevät. Aihion pituus nousee valssauksessa yleensä arvoon noin 100 m, ja maksimiarvo on 110 m. Pituisuuden kasvaessa myös teräsaihion pinta-ala kasvaa, mikä lisää ahiosta lähtevän lämpösäteilyn määrää. Aihiot liikkuvat aihioradoilla suojaamattomina ja lämpösäteily pääsee vapaasti säteilemään rataa ympäröiviin rakenteisiin. Kuvassa 3.18 näkyy 1000–1100 °C lämpöinen aihio, joka on valssattu useiden kymmenien metrien pituiseksi.



**Kuva 3.18.** Valssattu useiden kymmenien metrien pituinen aihio [32].

### 3.3.2.5 Lämpöolosuhteet rullakuljettimien läheisyydessä

Rullien lämpötila on noin 600–700 °C niiden ollessa rullakuljettimissa. Rullista lähtevä lämpösäteily kuumentaa rullakuljettimien läheisyydessä sijaitsevia rakenteita. Kuvassa 3.19 on esitetty rullakuljettimessa oleva lämpöä säteilevä rulla.



**Kuva 3.19.** Kuumasta teräsrullasta säteilee lämpöä rullakuljettimessa [32].



### **3.4 Kuumuuden vaikutus case-kohteiden rakenteisiin**

Case-kohteissa kuumuudelle alttiina olevissa rakenteissa on käytetty materiaaleina betonia, kuumuutta kestävää betonia, tulenkestävää massaa, tiilimuurauksia, terästä ja hiekkaa. Kuumuudelle alttiina ovat myös valvomoiden ikkunat.

Terässlatoissa ja kuumavalssaamoissa kuumuuden aiheuttamia haittoja ovat betonirakenteiden halkeilu ja rapautuminen, teräsrakenteiden väsyminen, teräsrakenteita suojaavan maalin palaminen, valvomon lasin sulaminen sekä seinien muurauksien ja massauksien mureneminen.

Teräksiset kulkutiet kuumenevat, mikä tekee niissä kulkemisen epämukavaksi. Kulkuteillä liikkuvat ovat myös alttiina lämpösäteilylle. Lisäksi kaapelien suojasukat sulavat. Lämpöolosuhteilla on myös suuri vaikutus kaasulinjojen sijoitteluun.

## 4 KUUMUUDENSUOJAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa kuvaillaan kuumuudensuojausmenetelmiä ja ideoita kuumuudensuojausratkaisuihin eri lämpötiloissa. Kuumuudensuojausmenetelmiä ovat mekaaniset kuumuudensuojausmenetelmät, lämmönlähteen koteloiminen sekä teräsbetonirakenteen betonipeitteen paksuuden kasvattaminen. Myös rakenteen sijoittelulla voidaan vaikuttaa rakenteen lämpötilaan.

### 4.1 Mekaaniset kuumuudensuojausmenetelmät

Mekaanisina kuumuudensuojausmenetelminä käytetään terästeollisuudessa ainakin tulenkestäviä tiiliä, tulenkestäviä massoja, kuitupohjaisia ja keraamisia kuumuudensuojauslevyjä, teräsverkkoja, teräspeltejä sekä ohuita ja paksuja teräslevyjä. Kuitupohjaisten kuumuudensuojauslevyjen käyttöön tulee suhtautua varauksella. Rautaruukin Raahen tehtaan kuumavalssaamossa käytetyt kuitupohjaiset kuumuudensuojauslevyt eivät ole kestäneet korkeita lämpötiloja, ja niitä joudutaan uusimaan muutaman vuoden välein, koska ne käyristyvät.

Rakenteen kuumuudensuojausta suunniteltaessa tulee selvittää ja huomioida rakenteeseen kohdistuvat lämpörasitukset sekä kemialliset ja mekaaniset rasitukset. Erittymisesti rauta- ja teräsprosesseissa muurauksiin ja vuorauksiin kohdistuu kemiallisia rasituksia, jotka aiheutuvat kuonan, sulan metallin ja atmosfäärin reaktioista vuorausmateriaalin kanssa. Mekaanista rasitusta aiheuttaa esimerkiksi sulan metallin tai kuonan roiskeet sekä niiden poistaminen.

#### 4.1.1 Tulenkestävä massa

Tulenkestävät massat ovat sementtipohjaisia kuumuudensuojausmateriaaleja, jotka kestävät sulamatta vähintään 1500 °C:n lämpötilaa. Ne kestävät lämpörasituksia yleensä paremmin kuin kuumuutta kestävä betoni, ja tietyt koostumukset sietävät sulan teräksen ja kuonan roiskeita. Tulenkestävien massojen yleisesti käytettyjä runkoaineita ovat magnesiit, alumiinioksidit, mullitit, samotit, kalsinoidut bauksiitit, oliviinit, zirkonit, kvartsit, sulasilikat, spinellit, grafiitit ja porsliinisirut. Myös ferrokromikuonaa voidaan käyttää runkoaineena. Tällöin massa ei kuitenkaan ole tulenkestävää vaan kuumuutta kestävä, sillä ferrokromikuona sulaa osittain alle 1300 °C:n lämpötilassa. [9]

Sideaineena käytetään yleensä aluminaattisementtiä. Valettavan tulenkestävän massan partikkelikoko on noin 0–6 mm ja ruiskutettavan massan alle 0,2 mm. Pieni partikkelikoko tekee ruiskutettavasta massasta laastimaisen. [9]

Tulenkestävien massojen koostumus määräytyy sen mukaan, minkälaiset ovat massaukseen kohdistuvat termiset, mekaaniset ja kemialliset rasitukset. Korkeat useiden satojen celsiusasteiden suuruiset lämpötilojen vaihtelut ovat myös massauksille hyvin suuria rasituksia. [9]

Tulenkestävillä massoilla suojataan yleensä prosessilaitteistoa, joka on koskeuksissa sulan teräksen tai kuonan kanssa. Tulenkestävää massaa käytetään myös yleisesti rakenteiden suojana lämpösäteilyltä, johtumisen kautta siirtyvältä lämmöltä sekä sulan metallin tai kuonan roiskeilta.

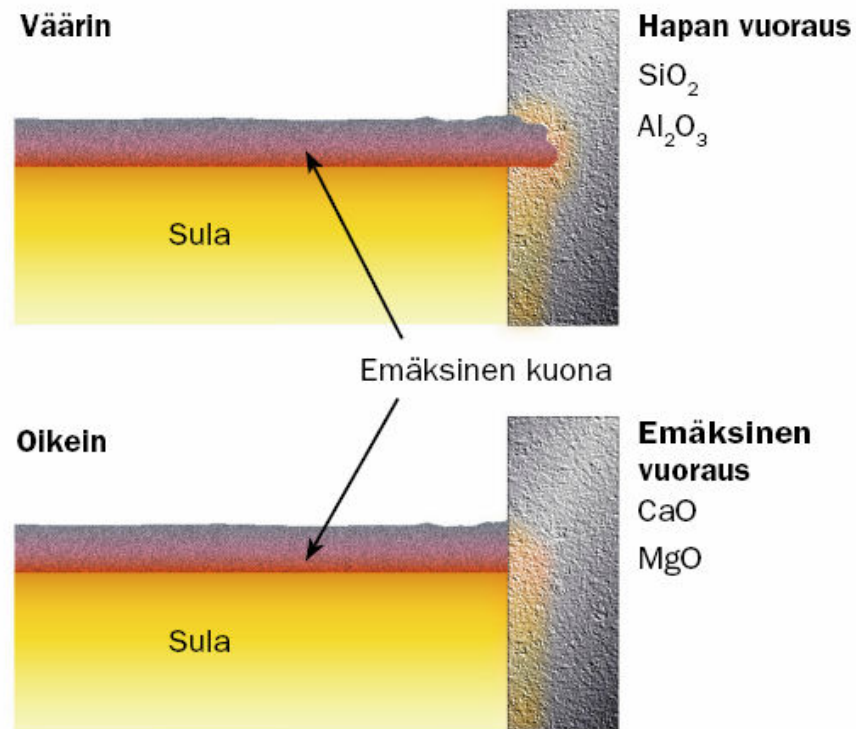
Jos massa on suojaamassa rakennetta lämpösäteilyltä, pitää sillä olla ainakin kohtuullinen tulenkestävyys ja lämpötilan vaihtelun kestävyys sekä hyvä lämmöneristyskyky. Jos rakenne on alttiina metallin ja sulan roiskeille, asettaa se massaukselle lisää vaatimuksia. [9]

Massojen käytöllä on muutamia etuja verrattuna tiiliin, kuten esimerkiksi asentamisen ja korjaamisen nopeus sekä saumaton vuorausrakenne. Tulenkestävien massojen kerrosvahvuudet ovat minimissään noin 20 mm ja maksimissaan noin 100 mm tuotevalmistajasta riippuen. [33]

Suojarakenne voi myös itsessään olla tulenkestävää massaa. Tällöin valumassauksessa voidaan käyttää teräskuituja massaan sekoitettuna [9]. Teräskuitujen materiaalina käytetään hiiliterästä, ruostumatonta terästä tai haponkestävää terästä [9]. Teräskuitujen osuus on yleensä 1–3 % massan kokonaispainosta [9]. Huomioitavaa kuitenkin on, että tulenkestävän massan puristuslujuus on yleensä pienempi kuin kuumuutta kestävä betonin. Näin ollen tulenkestävän massan käyttö kuormitetuissa rakenteissa voi olla hankalaa.

Massaus voidaan suorittaa valamalla, sullomalla, täryttämällä, linkoamalla ja täyttämällä. Yleisimmin tulenkestävä massa asennetaan suojattavaan rakenteeseen valamalla tai ruiskuttamalla. Ruiskutuksessa käytetään painekammioruiskutuslaitteistoa. Valamalla suojauksen laatu ja lujuus saadaan paremmaksi kuin ruiskuttamalla. Metallirakenteeseen asennettaessa käytetään harvaa ankkurointia. Valettaessa massaa suoraan betonin pintaan, ankkurointi ei ole välttämätön. Jos massa asennetaan täyttämällä, voidaan se tehdä valuttamalla kuiva massa taustavuorauksen ja muotin väliin ilman tärytystä ja vettä. Tällöin sitoutuminen tapahtuu lämmön avulla. Itsevaluvat liettyvät massat tiivistyvät myös ilman ulkoista tärytystä, mutta niihin pitää lisätä asennuksen aikana vettä. [9]

Rakenteeseen kohdistuvat kemialliset rasitukset on huomioitava tulenkestävän massan koostumuksen määrittämisessä. Massan koostumuksen on sovellettava kuonatyyppeihin. Esimerkiksi emäksinen eli paljon kalsiumoksidia sisältävä kuona liuottaa selkeästä vuorausta, joka sisältää paljon piioksidia eli hapanta vuorausta. Jos kuona on emäksinen, on käytettävä myös emäksistä tulenkestävää massaa. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 4.1. [33]



**Kuva 4.1.** Kuonan kemiallinen vaikutus vuorauksen suunnittelussa [33].

Huomioitavaa on, että kuonaroiskeet voivat liuottaa vuorausta. Näin ollen vuorauksen ei tarvitse olla jatkuvasti kiinni sulassa. Vuoraus voi olla suojaamassa rakennetta etäisyydellä, johon lentää kuonaroiskeita. Matalissa lämpötiloissa keraamiset vuorausmateriaalit ovat hauraita, mutta ne muuttuvat korkeissa lämpötiloissa plastisemmiksi ja mekaanista kulutusta paremmin kestäviksi [9].

Kuvassa 4.2 on esitetty ISO-standardin mukainen tulenkestävien tuotteiden luokittelu kemiallisen koostumuksen perusteella ja niiden käyttöesimerkkejä raudan ja teräksen tuotantolaitoksissa. Kuvaa voi hyödyntää määritettäessä kemiallisen rasituksen laatua teräs- ja kuonaroiskeille alttiissa rakenteessa, joka sijoittuu raudan tai teräksen tuotantolaitokseen.

## Käyttöesimerkkejä

### Silika:

- koksaspatterit
- jatkuvavalukoneen jatketiilet

### Samotti:

- masuunit
- lämpökäsittely- ja teelmäunit
- kuoppauunit
- taustavuoraukset

### Aloksi:

- sennkkojen ja jatkuvavalun välialtaan taustavuoraukset
- masuuni
- kuoppauunit
- rikinpoistoaseman lanssi

### Korkea-aloksi:

- terässenkat
- valokaariuunin holvit
- teelmäunien arinat
- kuoppauunit

### Magnesia:

- valokaariuunit
- terässenkat
- happipuhallus- ja AOD-konvertterit
- kalkkiuunit

### Magnesia-kromi:

- sementtiunit

### Kromi-magnesia:

- valokaariuunin kuonaranjan yläpuolinen osa
- kuoppauunit

### Doloma:

- valokaariuunit
- happipuhallus- ja AOD-konvertterit
- senkat



Kuva 24.3 Muuraamo.

Tuoteryhmä	Pääoksidipitoisuus
Aloksituotteet	
Ryhmä 1	$\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 56 \%$
Ryhmä 2	$45 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 56 \%$
Samottituotteet	$30 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 45 \%$
Happamet samottituotteet	$10 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 30 \%$ $\text{SiO}_2 < 85 \%$
Semi-silikatuotteet	$85 \% \leq \text{SiO}_2 < 93 \%$
Silikatuotteet	$\text{SiO}_2 \geq 93 \%$
Emäksiset tuotteet	
Magnesia	$\text{MgO} \geq 80 \%$
Magnesia-kromi	$55 \% \leq \text{MgO} < 80 \%$
Kromi-magnesia	$25 \% \leq \text{MgO} < 55 \%$
Kromiitti	$\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 25 \%$ $\text{MgO} < 25 \%$
Forsteriitti	
Doloma	
Erikoistuotteet	hiili, grafiitti, zirkonisilikaatti, zirkonioksidi, piikarbidi, muut karbidit, nitridit, boridit

Kuva 24.4 Tulenkestävien tuotteiden luokittelu (ISO 1109)

**Kuva 4.2.** ISO-standardin mukainen tulenkestävien tuotteiden luokittelu kemiallisen koostumuksen perusteella [33].

Lämpötila-alueella 20–400 °C tulenkestävän massan emissiokerroin on noin 0,8, ominaislämpökapasiteetti on noin 0,5–0,8 kJ/kg°K ja lämmönjohtavuus on noin 0,7–3,2 W/mK riippuen massan huokostuksesta, tiheydestä ja käytetyistä materiaaleista. [9]

### 4.1.2 Tulenkestävät tiilet

Tulenkestäviä tiiliä käytetään lämmönsuojauksena enimmäkseen rakenteissa, jotka ovat kosketuksissa sulan teräksen ja kuonan kanssa ja uuneissa. Tulenkestävät tiilet koostuvat vastaavista ainesosista kuin tulenkestävä massa. Tulenkestävissä tiilirakenteissa on huomattavasti enemmän saumakohtia verrattuna tulenkestävästä massasta tehtyihin rakenteisiin. Tulenkestävien tiilien käyttö terästeollisuudessa on vähentynyt viime vuosina, koska tulenkestävien massauksien hinta on tullut kilpailukykyisemmäksi.

### 4.1.3 Teräslevy

Teräslevyjä käytetään suojaamaan rakenteita lämpösäteilyltä sekä kuona- ja metallisula-roiskeilta. Teräksellä on hyvä emissiokerroin, ja se heijastaa siihen osuvaa lämpösäteilyä tehokkaasti. Tyypillinen emissiokerroin teräkselle 50 °C:n lämpötilassa on noin 0,20, ja ruostumattomalle teräkselle se on noin 0,13. Jos teräksen pinta on vahvasti oksidoitunut, sen emissiokerroin on huomattavasti suurempi. Emissiivisyyden arvoon vaikuttaa myös teräspinnan lämpötila. [34]

Case-kohteissa käytetään 2–3 mm:n paksuisia ruostumattomia teräslevyjä, joiden tehtävänä on suojata rakenteita vain lämpösäteilyltä. Niiden etäisyytenä lämmönlähteestä käytetään noin 2–10 m. Muutaman millimetrin paksuisen teräslevyn ja rakenteen välissä on oltava ilmarako, jotta lämpö ei pääse suoraan johtumaan teräslevystä rakenteeseen. Ilmaraon leveys on case-kohteissa noin 100–200 mm. Lämpösäteilyn kannalta läpikuultamattomana voidaan pitää 2–3 mm:n paksuista teräslevyä [5].

Muutaman millimetrin paksuiset teräslevyt eivät kestä metalli- ja kuonaroiskeita. Niitä ei kannatakaan käyttää paikoissa, joissa niiden pintaan voi kerääntyä epäpuhtauksia. Epäpuhtaudet nostavat teräslevyn emissiokerrointa ja laskevat heijastussuhdetta, jolloin teräslevystä heijastuvan lämpösäteilyn määrä pienenee, ja teräslevy absorboi enemmän lämpösäteilyä. Case-kohteissa on huomattu, että ruostumattomien teräslevyjen pinta ei juuri muutu tai haalene korkeissa lämpötiloissa.

Case-kohteissa käytetään 20–50 mm paksuisia teräslevyjä, joiden päätehtävänä on suojata rakenteita metalli- ja kuonaroiskeilta. Levyn paksuus valitaan suunnitteluvaiheessa sen mukaan, kuinka paljon levyyn tulee kohdistumaan roiskeita. Paksut teräslevyt kestävät metalli- ja kuonaroiskeita sekä mekaanisia rasituksia, jotka aiheutuvat roiskeiden poistamisesta. Roiskeille altistuneen teräslevyn pinnan emissiokerroin on huomattavasti suurempi kuin puhtaan ja oksidoitumattoman teräslevyn emissiokertoimen. Emissiokertoimien ero voi olla jopa nelin- tai viisinkertainen. Suuresta emissiokertoimesta huolimatta myös paksu ja roiskeille altistunut teräslevy suojaa rakennetta hyvin lämpösäteilyltä. Paksun teräslevyn ja rakenteen välissä on oltava ilmarako. Case-kohteissa on todettu, että teräslevyjä ei kannata maalata, koska käytetyt maalit eivät ole kestäneet korkeita lämpötiloja.

Huomioitavaa teräslevyn käytöstä lämpösäteilynsuojana on, että siitä säteilee lämpöä rakenteeseen teräslevyn rakenteen puoleisen pinnan lämpötilan noustessa rakenteen pintaa korkeammaksi. Teräksellä on pieni ominaislämpökapasiteetti ja suuri lämmönjohtavuus, joten teräslevyn lämpötila voi nousta varsin nopeastikin riippuen teräslevyn lämmönlähteestä saapuvan lämpöenergian määrästä. Lämpenevästä teräslevystä myös johtuu lämpöenergiaa teräslevyn ja rakenteen välisessä ilmaraossa olevaan ilmaan. Kun ilman lämpötila on suurempi kuin rakenteen, johtuu siitä lämpöä rakenteeseen, jolloin rakenteen lämpötila nousee. Ilmalla on kuitenkin varsin suuri ominaislämpökapasiteetti ja pieni lämmönjohtavuus, ja se lämpiää huomattavasti hitaammin kuin teräslevy. Teräslevy pitää aina suunnitella rakenteeseen siten, että se on jokaiselta sivulta avoin, jotta ilma pääsee vapaasti vaihtumaan ilmaraossa.

#### 4.1.4 Teräsverkko

Myös teräsverkkoa käytetään säteilysuojana. Sitä käytetään case-kohteissa suojaamaan muun muassa kulkuteitä, valvomoiden ikkunoita ja alueita, joissa työskennellään. Yleisesti teräsverkkoa käytetään säteilysuojana sellaisissa paikoissa, joissa on tarve nähdä säteilysuojan läpi. Myös teräsverkkoa käytettäessä pitää suojattavan rakenteen ja teräsverkon välissä olla ilmarako.

Teräsverkko estää lämpösäteilyn kulkeutumista, koska se luo katvetta suojattavan rakenteen eteen, tosin huomattavasti vähemmän kuin umpinainen teräslevy. Tämä ei kuitenkaan yksinään selitä teräsverkon varsin hyvää kykyä toimia säteilysuojana. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, ja osa säteilystä ei kunnolla pääse teräsverkon silmien läpi mahdollisesti sähkömagneettisista syistä. Teräsverkko saattaa kaapata tietyt säteilyn aallonpituudet riippuen teräsverkon silmäkoosta, jolloin vain osa lämpösäteilystä pääsee kulkeutumaan teräsverkon läpi.

Teräsverkko on heikompi lämpösäteilyn suoja kuin teräslevy. Teräsverkon etuna on, että ilma pääsee kulkeutumaan sen läpi. Näin ollen ilman vaihtuvuus ilmaraossa on suurempaa kuin teräslevyä käyttäessä. Teräsverkko on myös huomattavasti kevyempää kuin teräslevy, ja joissakin tapauksissa se on siksi helpompi asentaa säteilysuojaksi. Kuvassa 4.3 on esitetty valvomon ikkunaa lämpösäteilyltä suojaava tiheäsilmäinen teräsverkko.



**Kuva 4.3.** Teräsverkko suojaamassa ikkunaa lämpösäteilyltä.

## 4.2 Betonipeitteen paksuuden kasvattaminen

Teräsbetonisen rakenteen betoniterästen käyttölämpötilaa saadaan laskettua sijoittamalla betoniteräokset normaalia syvemmälle. Näin teräksiä suojaava betonipeite on paksumpi, ja se suojaa teräksiä paremmin korkeilta lämpötiloilta. Betonipeitteen suurimpana paksuutena käytetään yleensä 100 mm. Paksun betonipeitteen rapautuessa teräokset myös pysyvät kauemmin suojassa verrattuna nykyiseen tavanomaiseen noin 35–50 mm:n betonipeitteen paksuuteen. Osassa case-kohteiden rakenteista betonipeitteen paksuus on pienempi kuin 35 mm. Kyseisiä rakenteita on rakennettu aikana, jolloin teräokset voitiin suojata rakennusnormien mukaan noin 25 mm:n betonipeitteellä.

## 4.3 Rakenteen sijoittaminen

Rakenteeseen osuvan lämpösäteilyn intensiteetin suuruus riippuu voimakkaasti rakenteen etäisyydestä säteilylähteeseen. Mitä kauempana rakenne on säteilylähteestä, sitä pienempi on rakenteeseen kulkeutuvan säteilyn intensiteetti, ja sitä pienempi on säteilystä aiheutuva rakenteen lämpötilan nousu. Näin ollen suunnitteluvaiheessa voidaan rakenteeseen tulevan säteilyn intensiteettiin vaikuttaa rakenteen sijoittelulla.

## 4.4 Lämmönlähteen koteloiminen

Yksi keino vähentää lämmönlähteestä ympäröiviin rakenteisiin säteilevän lämpösäteilyn määrää on lämmönlähteen koteloiminen. Tällöin lämpö ei pääse säteilemään vapaasti lämmönlähteestä rakenteisiin. Huomioitavaa on, että myös koteloiva suoja säteilee lämpöä ympäröiviin rakenteisiin, jos se on lämpimämpi kuin ympäröivä rakenne.

Yksi esimerkki lämmönlähteen koteloinnista on kansien asentaminen avoimiin senkkoihin. Tällöin lämpö ei pääse vapaasti säteilemään senkasta ympäröiviin rakenteisiin.

Toinen esimerkki lämmönlähteen koteloinnista on aihio- tai rullaradan osien ympäröiminen umpinaisilla seinillä. Seinä pysäyttää osan radalla kulkevasta aihioista tai nauhasta vaakasuunnassa lähtevästä lämpösäteilystä.

## 4.5 Kuumuudensuojaustratkaisujen ideointia

Tähän kappaleeseen on koottu ideoita betoni- ja teräsrakenteiden suojauksesta lämpösäteilyltä. Ideat perustuvat kokemuseräiseen tietoon sekä arvioihin. Kokemuseräinen tieto ja arviot ovat peräisin Outokummulta, Rautaruukilta, Ruskon Betonilta, Rudukselta ja Pöyryltä. On huomioitava, että kokemuseräinen tieto ja arviot ovat vain suuntaa-antavia ja niihin pitää suhtautua varauksella.

Tässä kappaleessa ei ole huomioitu rakenteen lämpenemisestä aiheutuvia staattisia rasituksia, jotka voivat olla korkeissa lämpötiloissa merkittäviä. Rakenteen tai sen osan lämpenemisestä aiheutuvat staattiset rasitukset pitää huomioida rakenteiden mitoituksessa.



Alakappaleiden otsikoissa olevat lämpötila-alueet ovat ne lämpötilat, jotka olisivat suojaamattomalla betoni- tai teräsrakenteella.

#### **4.5.1 Rakenteen pinta lämpötilassa 0–100 °C**

Betonirakenne voidaan toteuttaa Portland-sementtibetonista. Betonin huokosissa oleva vesi ja kidevesi eivät vielä höyrysty. Betonin runko- ja sideaineiden lämpölaajenemisesta aiheutuvat lämpöjännitykset eivät ole niin suuria, että niiden vaikutuksesta betoni vaurioituisi. Myös teräsrakenne voidaan toteuttaa suojaamattomana alle 100 °C:n lämpötilassa.

#### **4.5.2 Rakenteen pinta lämpötilassa 100–200 °C**

Betonirakenteen lämpötilan noustessa arvoon 100 °C alkaa sementtikiven sementtihydraateista ja kalsiumhydroksidista vapautua vesihöyryä ja betonissa oleva huokosvesi höyrystyä. Vesihöyryn vapautuminen sementtihydraateista ja kalsiumhydroksidista heikentää betonin lujuusominaisuuksia. Betoni alkaa hiljalleen rapautua.

Kun Portland-sementtibetonirakenteen pintalämpötila nousee yli 100 °C:n suuruiseksi, pitää rakenne suojata. Yksi hyvä vaihtoehto suojaukseen on kappaleessa 4.1.3 esitetty 2–3 mm:n paksuinen ruostumaton teräslevy sekä 100–200 mm:n levyinen ilmarako. Myös mineraalivillaeristeen asentaminen betonirakenteen pintaan on vartenotettava vaihtoehto.

Betonirakenne voidaan toteuttaa suojaamattomana pintalämpötilan ollessa yli 100 °C, kun käytetään betonilaatuna kuumuutta kestävää betonia. Myös teräsrakenne voidaan toteuttaa suojaamattomana yli 100 °C:n lämpötilassa.

#### **4.5.3 Rakenteen pinta lämpötilassa 200–300 °C**

Lämpötila-alueella 200–300 °C voidaan käyttää kuumuutta kestävää betonia suojaamattomana betonirakenteissa. Myös teräsrakenne voidaan toteuttaa suojaamattomana.

Mahdollisesti myös Portland-sementtibetonia voitaisiin käyttää betonirakenteessa, mutta tällöin rakenne pitäisi suojata huolellisesti esimerkiksi mineraalivillakerroksella sekä sen päälle asennettavalla ruostumattomalla teräslevyllä. Mineraalivillan ja ruostumattoman teräslevyn välissä on oltava ilmarako.

#### **4.5.4 Rakenteen pinta lämpötilassa 300–400 °C**

Lämpötila-alueella 300–400 °C kuumuutta kestävää betonia voidaan käyttää betonirakenteessa. Betonin valmistajalta pitää selvittää betonilaadun soveltuvuus, johon vaikuttaa oleellisesti lämpötilan vaihtelu rakenteessa.

Teräsrakenteen suojaustarpeeseen vaikuttaa rakenteen suunniteltu käyttöikä. Jos teräsrakenteelle suunnitellaan useiden kymmenien vuosien käyttöikä, voi lämpörasituksesta aiheutuva viruma ja väsyminen olla merkittäviä tekijöitä. Teräsrakenne voidaan

tarvittaessa suojata 2-3 mm:n paksuisilla ruostumattomilla teräslevyillä sekä ilmaraolla tai lämpötilaa kestäväällä mineraalivillakerroksella.

#### **4.5.5 Rakenteen pinta lämpötilassa 400–600 °C**

Kuumuutta kestävä betonin soveltuvuus suojaamattomana lämpötila-alueella 400–600 °C pitää selvittää tapauskohtaisesti. Oleelliset asiat betonilaadun soveltuvuuden määrittämisessä ovat lämpötilan suuruus ja vaihtelu sekä suunniteltu rakenteen käyttöikä. Jos lämpötilan vaihtelu ei ole suurta, niin kuumuutta kestävä betonia pystyy varmasti käyttämään. Tällöin lämpötilan vaihteluväli voisi olla maksimissaan noin 200 °C. Asiasta pitää kuitenkin tapauskohtaisesti keskustella betonin valmistajan kanssa.

Jos kuumuutta kestävä betonia suojataan, niin yksi vaihtoehto on tulenkestävän massakerroksen vuoraaminen kuumuutta kestävä betonin pinnalle. Massan soveltuvuus lämpö- ja kemiallisiin rasituksiin pitää selvittää tapauskohtaisesti aina tuotevalmistajalta. Massan kerrosvahvuus on maksimissaan noin 100 mm tuotevalmistajasta riippuen. Rakenteen lämpötila pienenee huomattavasti, jos massakerroksen ja materiaalin väliin jätetään ilmarako. Ilmaraon jättämisestä voisi yli 500 °C:n lämpötilassa, jos lämpötilan vaihtelu on suurta. Tulenkestävän massan pitää tarvittaessa kestää sulan teräksen tai kuonan roiskeita ja niiden poistamisesta aiheutuvaa mekaanista rasitusta. Rakenne voidaan toteuttaa kokonaan tulenkestävästä massasta, jos se ei ole kantava rakenne.

Kuumuutta kestävä betonin suojaaminen voidaan toteuttaa myös lämpötilaa kestäväällä mineraalivillakerroksella. Mineraalivillakerros suojaa erinomaisesti lämpötilan vaihtelulta. Huomioitavaa on, että se ei kuitenkaan kestä sulan teräksen ja kuonan roiskeita tai niiden poistamisesta aiheutuvaa mekaanista rasitusta. Jos roiskeita esiintyy, pitää mineraalivillakerros suojata 20 mm paksulla teräslevyllä. Lisäksi on syytä harkita betoniteräksille 100 mm:n peitepaksuutta, koska se suojaa betoniteräksiä roiskeilta teräslevysuojan peittäessä. 100 mm:n peitepaksuutta käytetään yleensä 600–700 mm:n paksuisissa rakenteissa. Jos roiskeita ei esiinny, voidaan suojausta tehostaa asentamalla villan päälle 2-3 mm:n paksuinen ruostumaton teräslevy ilmaraolla.

Teräsrakenne pitää suojata lämpötila-alueella 400–600 °C. Myös teräsrakenne voidaan suojata ohuella ruostumattomalla teräslevyllä tai mineraalivillakerroksella. Suojatun teräsrakenteen lämpötila ei saa nousta yli 400 °C:seen. Roiskeille altis betoni- tai teräsrakenne voidaan suojata myös noin 20 mm:n paksuisella teräslevyllä ja ilmaraolla.

#### **4.5.6 Rakenteen pinta lämpötilassa 600–700 °C**

Lämpötila-alueella olevia rakenteita voi esiintyä käytännössä vain sulan teräksen ja kuonan läheisyydessä tai rullaratojen yläpuolella alle 1,2 m:n etäisyydellä kuumista aihioista. Lämpötila-alueella 600–700 °C voidaan käyttää vastaavanlaisia suojausperiaatteita betoni- ja teräsrakenteissa kuin lämpötila-alueella 400–600 °C.

Käytettäessä 20 mm:n paksuista teräslevyä ja ilmarakoa, pitää betonirakenne tarvittaessa suojata paksulla lämpötilaa kestäväällä mineraalivillakerroksella. Yksi vaihtoehto on myös ilmanvaihdon tehostaminen ilmaraossa noin 20 mm paksun teräslevyn

ja seinän välissä kun rakenteena on seinä tai laatta. Tämä voidaan toteuttaa koneellisella puhalluksella tai asentamalla ulkoilmaan yhteydessä olevia hormeja.

Teräslevyä käytettäessä olisi teräsrakenteen päällä oltava lämpötilaa kestävä mineraalivillakerros, joka olisi lämpötila-alueella 400–600 °C käytettävää kerrosta paksuampi.

#### **4.5.7 Rakenteen pinta yli 700 °C:n lämpötilassa**

Yli 700 °C:n lämpötilassa voidaan käyttää kuumuutta kestävää betonia suojaamattomana vain, jos lämpötila ei juuri vaihtelee, ja roiskeita ei esiinny. Tällöin kuumuutta kestävä betoniin käyttöä pitää tarkkaan arvioida betonin valmistajan kanssa. Turvallisempaa on kuitenkin toteuttaa rakenne kokonaan tulenkestävästä massasta, jos rakenne ei ole kantava.

Tulenkestävä massa voidaan tarvittaessa suojata noin 20 mm:n paksuisella teräslevyllä, ilmaraolla ja lämpötilaa kestävällä mineraalivillalla. Huomioitavaa kuitenkin on, että teräslevy pehmenee ja käyristyy teräslevyn lämpötilan noustessa reilusti yli 700 °C:n. Myös ilmanvaihdon tehostaminen seinä- tai laattarakenteessa suojarakenteen ilmaraossa on varsin hyvä vaihtoehto yli 700 °C:n lämpötiloissa. Tarvittaessa voitaisiin rakenteen pintaan asentaa lisäksi lämpötilaa kestävä mineraalivillakerros.

## 5 MITTAUKSET

Lämpö- ja lämpösäteilymittaukset suoritettiin Outokummun Tornion terästehtaan teräs-sulatossa 23.11.2012. Lämpömittauksilla oli kaksi tarkoitusta.

Yksi tarkoitus oli saada mittaustietoa, jonka pohjalta voitaisiin selvittää, kuinka hyvin 3 mm:n paksuinen ruostumaton teräslevy suojaa betoni- ja teräsrakennetta lämpösäteilyltä. Toinen tarkoitus oli mittaustiedon hankkiminen vertailupohjaksi ohjelmistopohjaisella lämpömallinnuksella lasketuille lämpötila-arvoille sekä säteilyteholle.

Vertailemalla lämpömallinnuksesta saatujen rakenteiden lämpötilojen ja todellisten mitattujen rakenteiden lämpötilojen arvoja, voidaan arvioida lämpömallinnusohjelmiston tarkkuutta ja luotettavuutta.

### 5.1 Tutkittavat kohteet

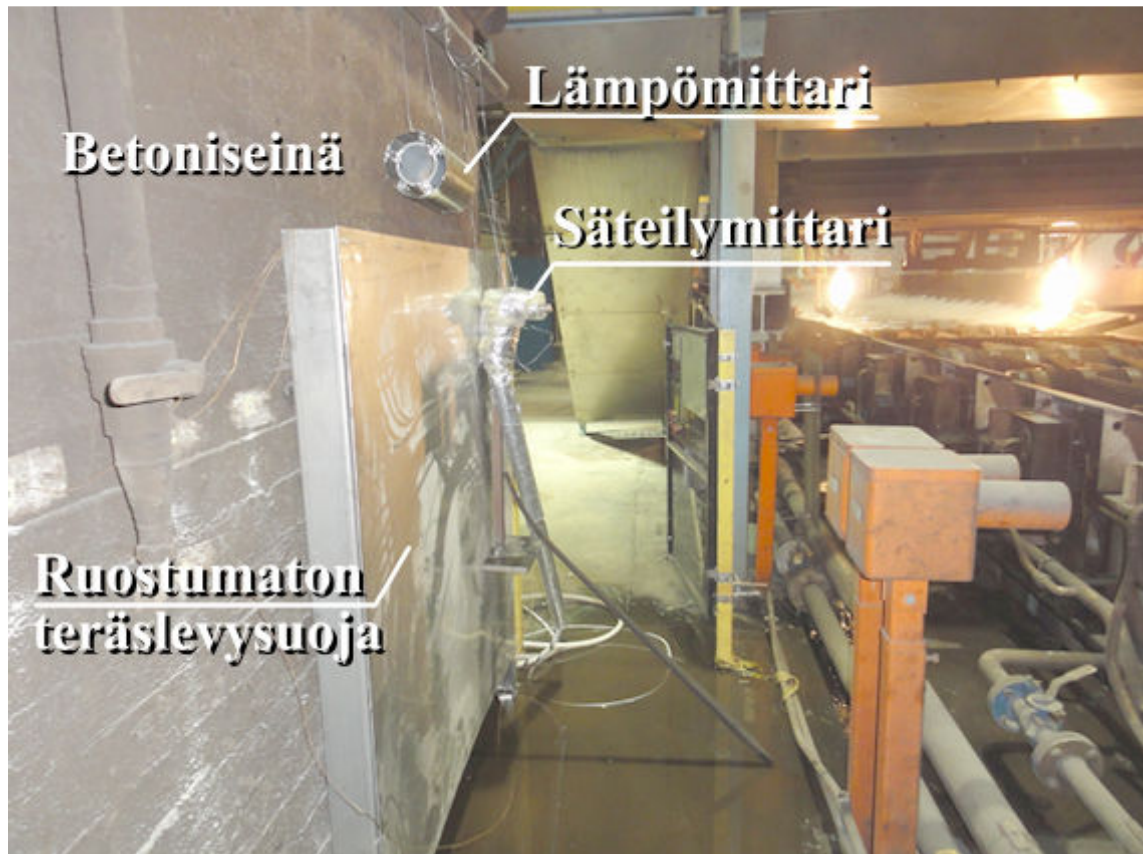
Mittaukset koskivat betoni- ja teräsrakenteiden lämmönlähteen puoleisten pintojen lämpötiloja, lämpösäteilyn tehoa sekä ilman lämpötilaa. Tutkittavina kohteina pintalämpötilan mittauksissa olivat suojaamaton betoniseinä, 3 mm paksulla ruostumattomalla teräslevyllä suojattu betoniseinä, suojaamaton teräspalkki sekä 3 mm paksulla ruostumattomalla teräslevyllä suojattu teräspalkki.

Lämpösäteilyn tehoa mitattiin betoniseinän lämmönlähteen puoleisesta pinnasta noin 1500 mm:n korkeudella lattiasta. Ilman lämpötilaa mitattiin myös betoniseinän lämmönlähteen puoleisesta pinnasta noin 1900 mm:n korkeudella lattiasta.

Tutkittavat kohteet sijaitsivat jatkuvavalukone 1:n rullaradan välittömässä läheisyydessä. Sulaton tuotantoprosessin vaihe tutkittavien kohteiden kohdalla oli jatkuva-valukoneen valukaaren sekä polttoleikkauskoneen välissä. Katso luvussa 3.2 esitetyt kuvat 3.4 ja 3.5.

#### 5.1.1 Betoniseinä

Betoniseinän mitat olivat noin 8,0 m x 7,0 m x 0,280 m. Betoniseinään oli viikkoa ennen mittausten suoritusta kiinnitetty säteilysuojaksi mitoiltaan 1500 mm x 1500 mm x 3 mm:n kokoinen ruostumaton teräslevy. Teräslevyn ja seinän välissä oli syvyydeltään 100 mm:n ilmarako. Teräslevy oli 200 mm:n etäisyydellä lattian pinnasta ja 100 mm:n etäisyydellä betoniseinän nurkasta. Levyn kiinnitys oli sellainen, että ilma pääsi vapaasti kiertämään ilmarakoon levyn ylä- ja alareunasta. Kuvassa 5.1 näkyy suojaamaton betoniseinä, ruostumaton teräslevysuojaus, lämpösäteilymittari ja lämpötilamittari. Betoniseinä oli varsin pölyinen, ja sen pinta oli hieman rapautunut.



**Kuva 5.1.** Vasemmalla näkyy mittauksen kohteena ollut betoniseinä, ruostumaton teräslevy sekä mittauslaitteistoa. Kuvan oikeassa reunassa rullarata on osittain näkyvissä.

### 5.1.2 Teräspalkki

Suojaamattoman teräspalkin sekä 3 mm paksulla ruostumattomalla teräslevyllä ja 100 mm paksulla ilmaraolla suojatun teräspalkin profiilina oli IPE-200. Suojattu teräspalkki oli osa rullaradan yli kulkevan kulkutien rakenteita, ja se sijaitsi 1400 mm teräsaihion yläpuolella. Suojaamaton teräspalkki oli irtomainen ja 1500 mm pitkä. Myös se sijaitsi 1400 mm teräsaihion yläpuolella ja se oli kiinnitetty ketteillä kulkutien kaiteeseen. Suojaamaton teräspalkki sekä kulkutien palkkia suojaava ruostumaton teräslevy näkyvät kuvassa 5.2.



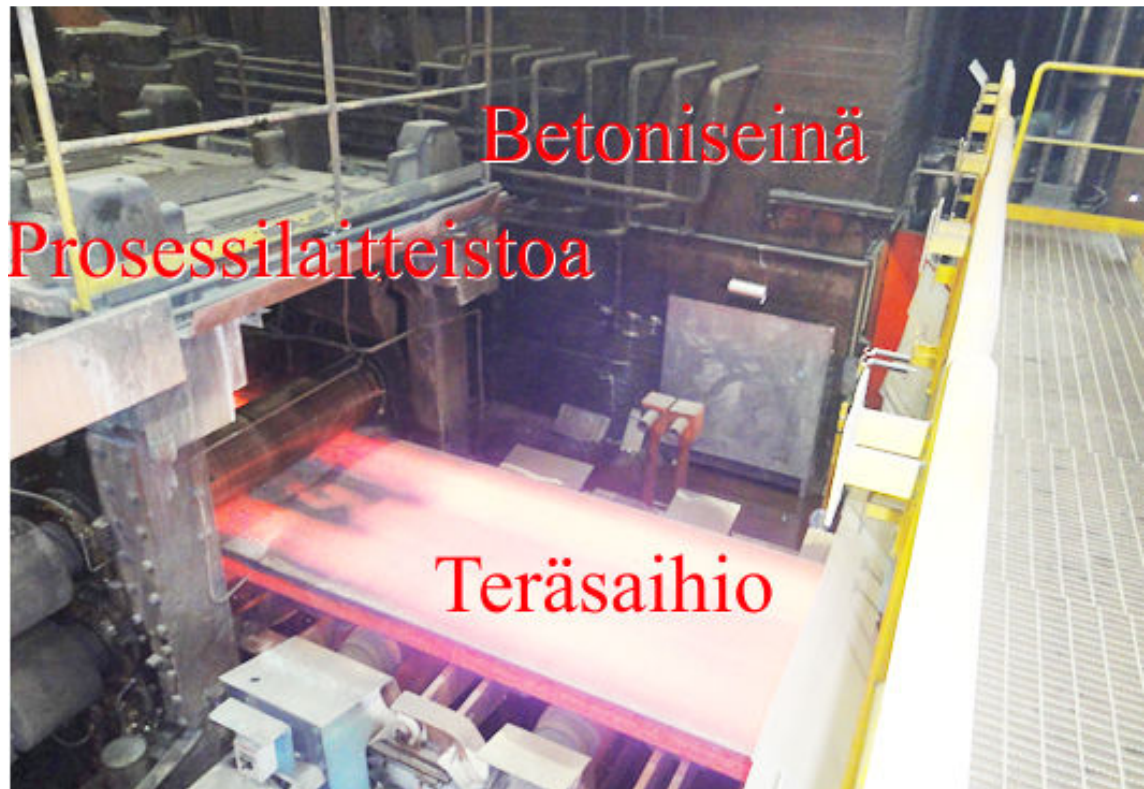
***Kuva 5.2.** Suojaamattoman teräspalkin vieressä on ruostumaton teräslevy suojaamassa sen takana olevaa teräspalkkia, joka kuuluu kulkutien rakenteisiin.*

## **5.2 Lämmönlähde**

Lämmönlähteenä oli 167 mm paksu jatkuvavalettava teräsaihio, jota valettiin kolmeen eri leveyteen neljässä valussa. Aihion vaakaetäisyys betoniseinästä oli noin 2700–2900 mm aihion leveydestä riippuen. Ensimmäisessä 1 h 10 min -pituisessa valussa aihioleveys oli 1400 mm, toisessa 2 h 30 min -pituisessa valussa aihioleveys oli 1200 mm, kolmannessa 1 h 10 min -pituisessa valussa aihioleveys oli 1400 mm ja neljännessä 3 h 35 min -pituisessa valussa aihioleveys oli 1610 mm.

Aihion yläpinnan korkeus lattiapinnasta oli noin 1050 mm. Teräsaihion lämpötila oli noin 850 °C. Valettava aihio pääsi säteilemään suoraan betoniseinään noin 7 metrin matkalta. Loppuosa ahiosta oli betoniseinään nähden katveessa. Valettava teräsaihio sekä katveena olevaa prosessilaitteistoa on esitetty kuvassa 5.3.





*Kuva 5.3. Lämmönlähteenä oli jatkuvavalettava teräsaihio.*

### 5.3 Mittausperiaatteet ja mittauslaitteet

Mittaukset sisälsivät yhteensä kolme tai neljä valua mittapistestä riippuen. Osa mittauslaitteista asennettiin ennen ensimmäistä valua ja loput ensimmäisen ja toisen valun välissä, jolloin lämmönlähdettä ei ollut. Betoniseinän lämpömittaukset suojattuna ja suojaamattomana sisälsivät neljä valua lukuun ottamatta mittapistettä 13, joka sisälsi kolme valua. Teräspalkin lämpömittaukset suojattuna ja suojaamattomana, ilman lämpömittaus sekä lämpösäteilyn tehon mittaus sisälsivät kolme valua. Ensimmäisessä valussa aihioleveys oli 1400 mm, toisessa 1200 mm, kolmannessa 1400 mm ja neljännessä 1610 mm.

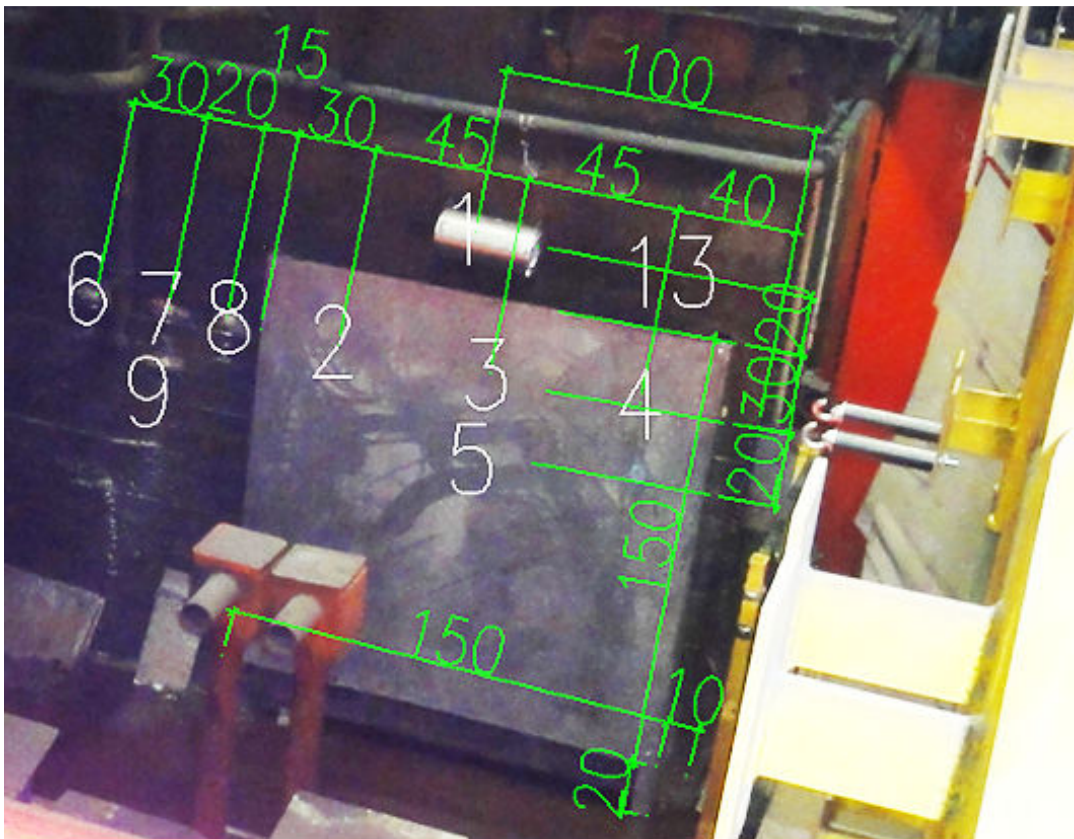
Mittauslaitteina käytettiin ilmalämpömittaria, lämpösäteilymittaria sekä K-tyypin termopareja, jotka oli kytketty lämpötietojen tallennuslaitteeseen (loggeriin). Betoniseinän lämpötilojen mittauksessa termoparien päissä oli kuparilevyt. Niiden päällä oli ohuet eristelevyt, jotka estivät kuparilevyjen suoran altistumisen lämpösäteilylle. Kuparilevyt lämpenivät reunoista johtumalla betoniseinän pinnan lämpötilaan. Kuvassa 5.4 on esitetty betoniseinään kiinnitetty termopari. Kuvassa näkyy myös termoparin kiinnityspeiraate. Ennen termoparien kiinnitystä betoniseinä puhdistettiin pölystä mittapisteen kohdalta.



**Kuva 5.4.** K-tyypin termopari kiinnitettynä betoniseinään.

Lämpösäteilyn tehoa mitattiin vesijäähdytteisellä lämpösäteilymittarilla. Sillä mitattiin betoniseinään kohdistuvaa säteilytehoa, ja se sijaitsi noin 1500 mm:n korkeudella lattian pinnasta, noin 200 mm:n etäisyydellä betoniseinän pinnasta sekä noin 600 mm:n etäisyydellä betoniseinän nurkasta.

Ilmalämpömittarilla mitattiin ilman lämpötilaa lähellä betoniseinän pintaa. Se sijaitsi noin 1900 mm:n korkeudella lattian pinnasta, noin 100 mm:n etäisyydellä betoniseinän pinnasta sekä noin 1000 mm:n etäisyydellä betoniseinän nurkasta. Kuvassa 5.5 on esitetty betoniseinän mittapisteet sekä sijainti. Yksikkönä kuvassa ovat senttimetrit.

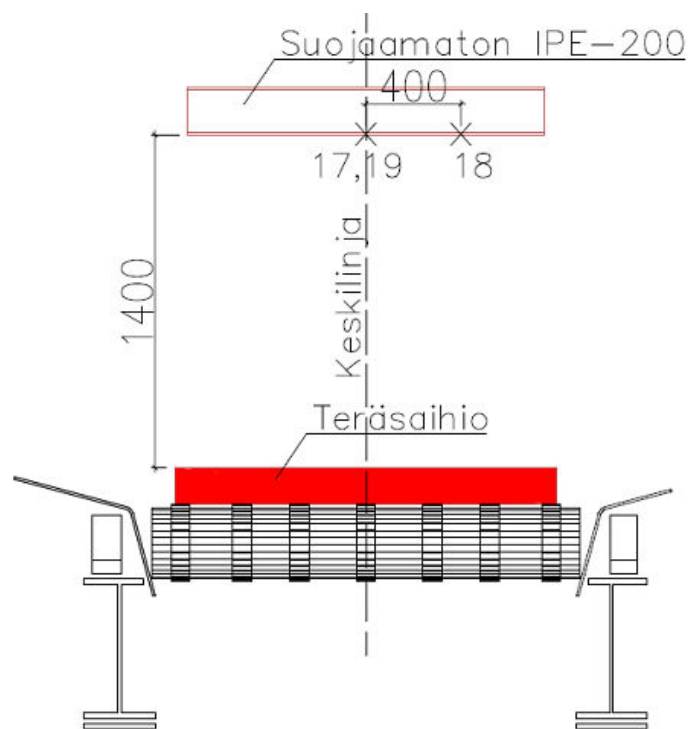


**Kuva 5.5.** Mittapisteet betoniseinän pinnassa.



Teräspalkkien lämpötilojen mittauksessa palkkien 8,5 mm paksujen alalaippojen yläpintoihin porattiin noin 6 mm syvät kolot, joiden pohjalle termoparit juotettiin. Näin ollen termoparit mittasivat palkin alalaippojen lämpötilaa noin 2,5 mm:n syvyydeltä kuumasta pinnasta katsottuna. Mitatut lämpötila-arvot ovat erittäin lähellä laippojen pintalämpötiloja. Kaikki mittaustulokset teräspalkeille koskevat teräspalkkien alalaippoja, jotka kuumenivat palkkien osista eniten.

Kuvassa 5.6 on esitetty mittapisteiden sijainti suojaamattomassa teräspalkissa. Kuvassa 5.7 on esitetty mittapisteiden sijainti ruostumattomalla teräslevyllä ja 100 mm paksuisella ilmaraolla suojatussa teräspalkissa.



**Kuva 5.6.** Mittapisteet suojaamattomassa IPE-200-palkissa.



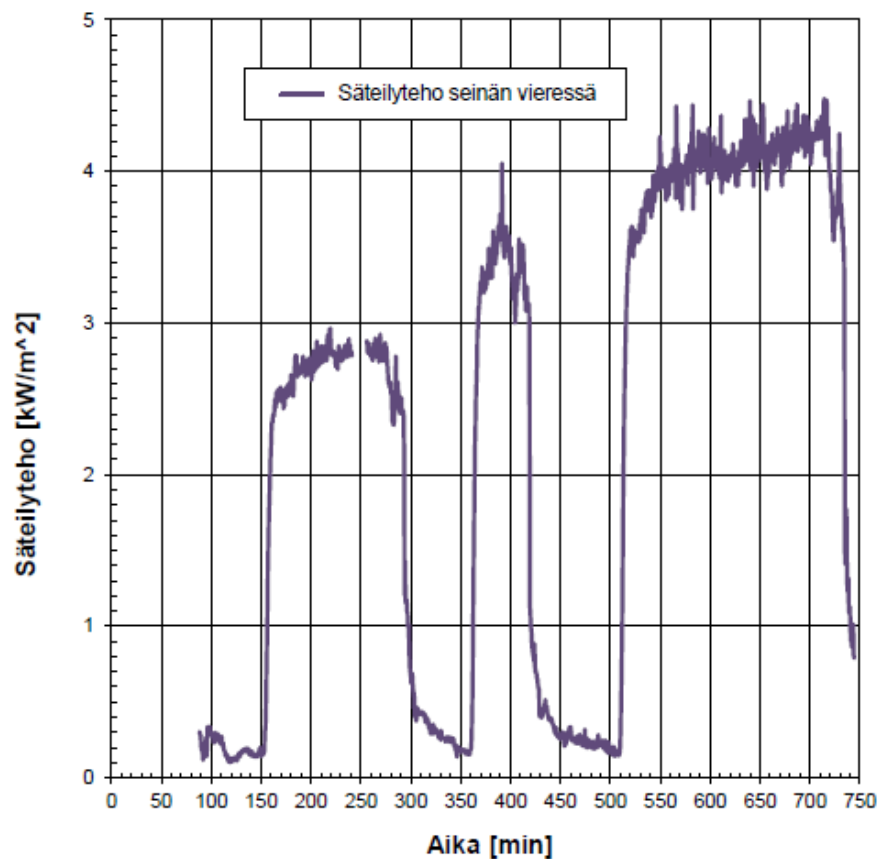
## 5.4 Mittaustulokset ja niiden tarkastelu

Alakappaleissa on esitetty graafisessa muodossa ajasta riippuvat arvot säteilyteholle, ilman lämpötilalle sekä lämpötiloille rakenteiden pinnoissa. Mittapisteiden sijainti on esitetty kappaleessa 5.3.

### 5.4.1 Lämpösäteilyn teho lähietäisyydellä betoniseinästä

Ajasta riippuva lämpösäteilyn teho on esitetty kuvassa 5.8. Arvot on mitattu noin 200 mm:n etäisyydeltä betoniseinän pinnasta. Näin ollen ne ovat hieman suuremmat kuin säteilytehon arvot betoniseinän pinnassa.

Huomioitavaa on, että vesijäähdytteisen lämpösäteilymittarin metallisen anturin pintalämpötila ei juuri nouse mittauksen aikana. Jos pintalämpötila nousisi, se pienentäisi mitatun säteilytehon arvoa.



**Kuva 5.8.** Lämpösäteilyn teho noin 200 mm:n etäisyydeltä betoniseinän pinnasta.

Korkein säteilyteho oli neljännessä valussa, jolloin aihioleveys oli suurin ja aihion etäisyys betoniseinään pienin (2700 mm). Neljäs valu oli myös pitkäkestoisin. Säteilytehon arvo oli tuolloin suurimmillaan yli 4 kW/m<sup>2</sup>.

Korkeimmasta säteilytehosta ja valun pituudesta johtuen kaikissa mittapisteissä suurimmat lämpötilat olivat neljännessä valussa. Pienin säteilyteho oli toisessa valussa,

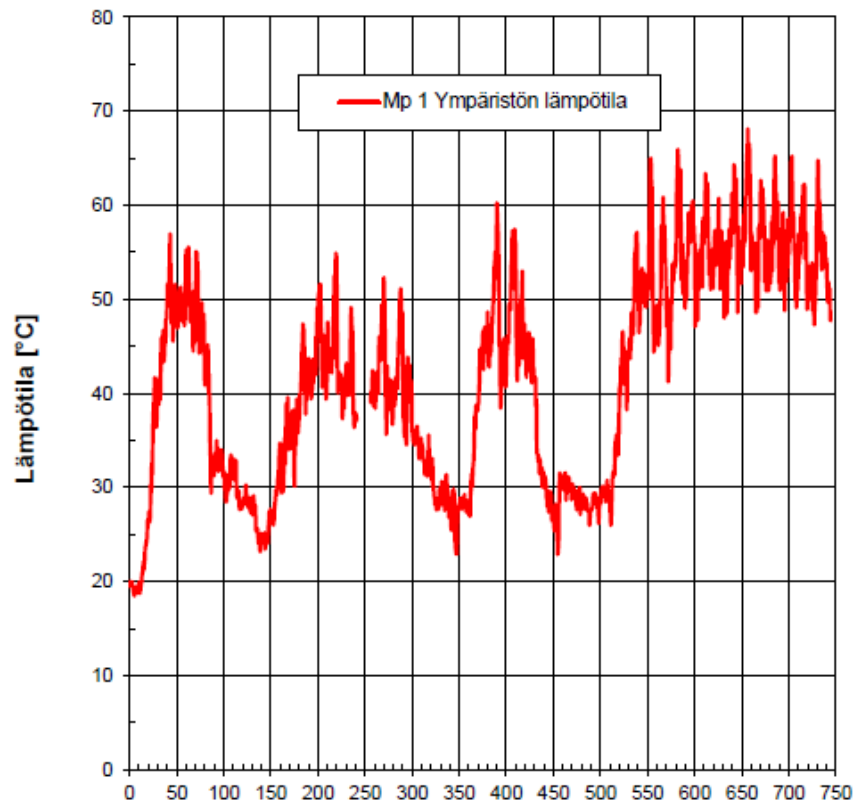
jolloin aihioleveys oli pienin (2900 mm). Säteilytehon arvo oli tuolloin suurimmillaan noin  $2,8 \text{ kW/m}^2$ .

Säteilymittari ei ollut asennettuna vielä ensimmäisessä valussa, joten siitä ei ole säteilytehotietoja saatavilla. Valu oli kuitenkin lähes identtinen kolmannen valun kanssa, joten säteilytehokin on oletettavasti ollut samaa luokkaa kuin kolmannessa valussa.

Valujen välissä säteilyteho putosi hyvin pieneksi, alle  $0,2 \text{ kW/m}^2$ :n suuruiseksi. Tuolloin lämpösäteilyn lähteenä ovat pääosin aihion kuumentamat rullaradan, valukaa-ren sekä polttoleikkauskoneen rakenteet. Valujen aikana todettiin, että yli  $2 \text{ kW/m}^2$ :n säteilyteho tuntuu epämiellyttävältä.

#### 5.4.2 Ilman lämpötila lähietäisyydellä suojaamattomasta betoniseinästä

Ajasta riippuva ilman lämpötila on esitetty kuvassa 5.9. Arvot on mitattu noin 100 mm:n etäisyydeltä betoniseinän pinnasta.

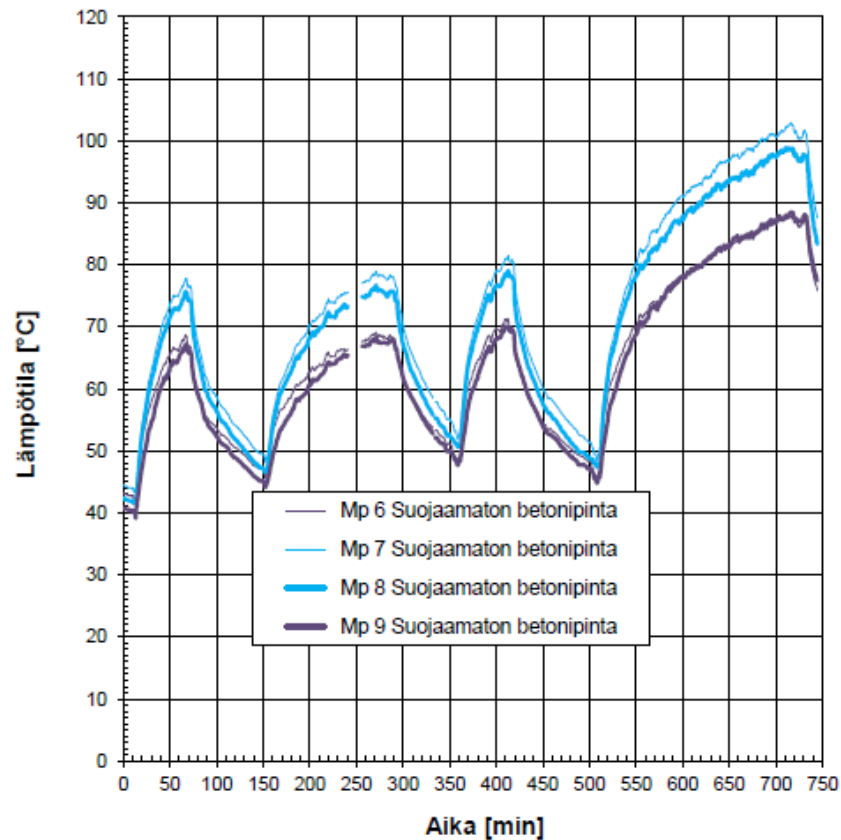


**Kuva 5.9.** Lämpösäteilyn teho noin 200 mm:n etäisyydeltä betoniseinän pinnasta.

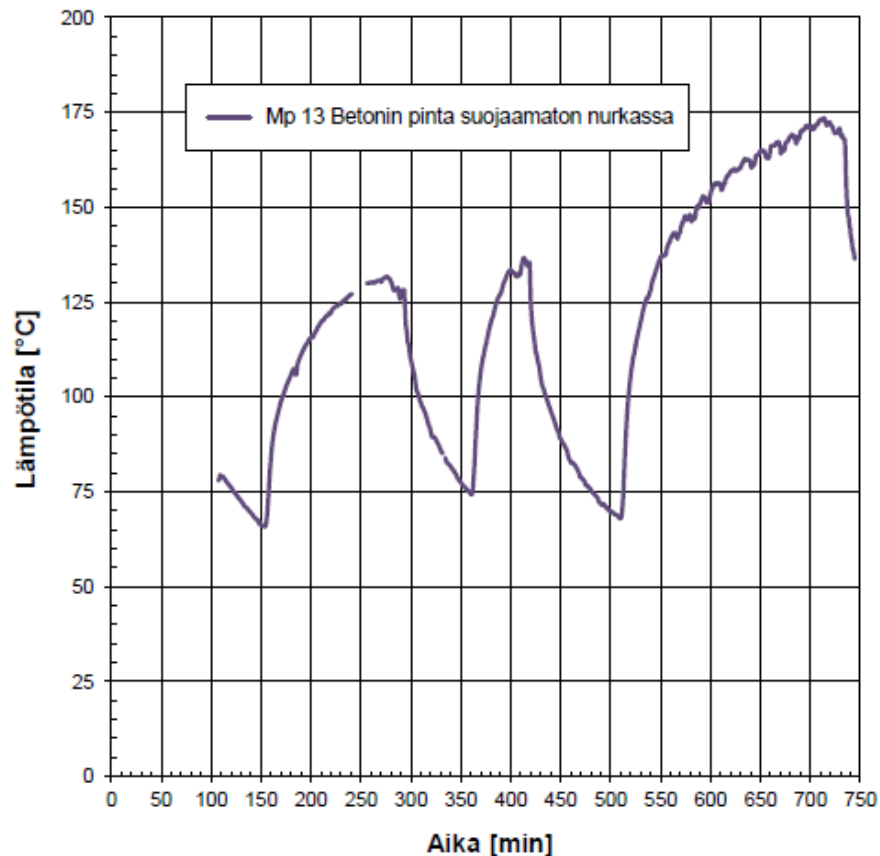
Ilman lämpötila oli valujen aikana korkeimmillaan yli  $50 \text{ °C}$ . Valujen välissä ilman lämpötila laski alle  $30 \text{ °C}$ :n arvoon. Huomioitavaa on, että mittauksissa ilman lämpötila ei noussut kovin korkeaksi vaikka säteilyteho oli varsin korkea.

### 5.4.3 Lämpötila suojaamattomassa betoniseinässä

Betoniseinän pintalämpötilaa mitattiin lähellä seinän nurkkaa ja yli 1750 mm:n etäisyydellä nurkasta. Ajasta riippuva suojaamattoman betonipinnan lämpötila mittapisteissä 6–9 yli 1750 mm:n etäisyydellä nurkasta on esitetty kuvassa 5.10. Lämpötila-arvot lähellä seinän nurkkaa mittapisteessä 13 on esitetty kuvassa 5.11.



**Kuva 5.10.** Pintalämpötila suojaamattoman betoniseinän mittapisteissä 6–9.



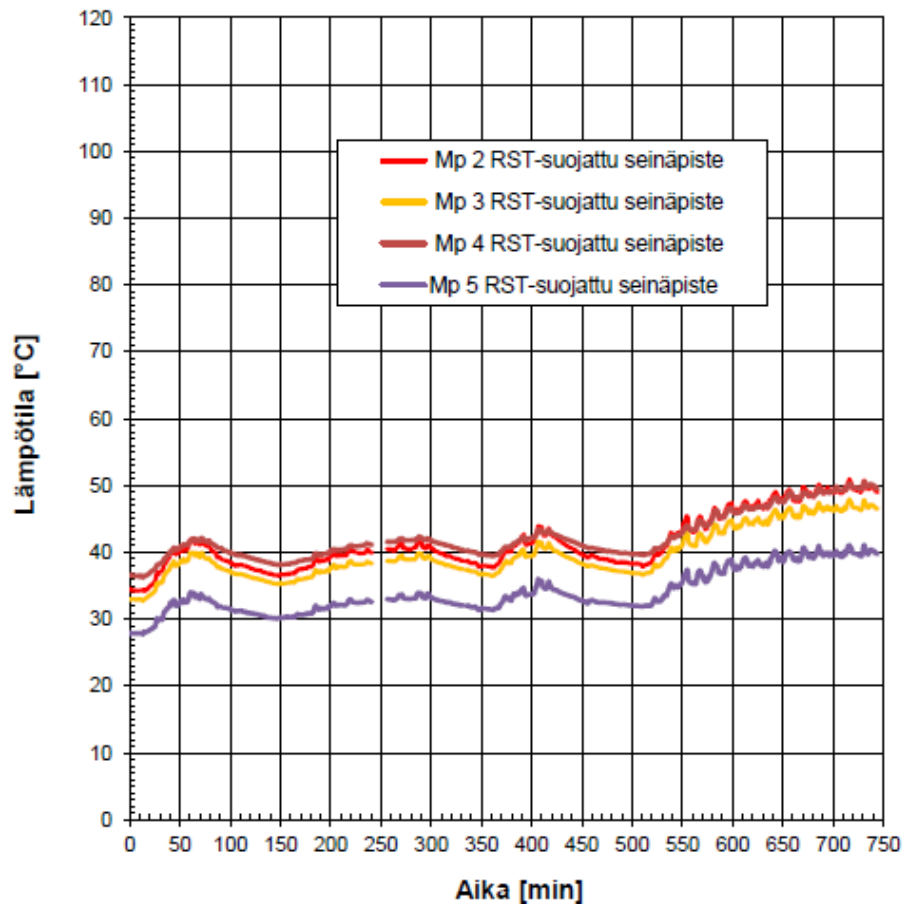
**Kuva 5.11.** Pintalämpötila suojaamattoman betoniseinän mittapisteessä 13 lähellä nurkkaa.

Pintalämpötila suojaamattomassa betoniseinässä oli suurimmillaan noin 172 °C. Tämä arvo oli mittapisteessä 13 lähellä betoniseinän nurkkaa. Nurkassa ja sen lähellä pinnan lämpötilat ovat suurempia kuin muualla seinässä, koska nurkassa lämpösäteilylle alttiina olevia pintoja on kaksi. Mittapiste 13 oli myös korkeammalla kuin muut suojaamattoman betonipinnan lämpötilan mittapisteet.

Yli 1750 mm:n etäisyydellä nurkasta sijaitsevalle mittapisteelle korkein lämpötila oli noin 102 °C. Tämä arvo oli mittapisteessä 7. Mittapisteissä 6 ja 9 lämpötilat olivat pienimpiä, ja korkeimmillaan lämpötilojen arvot olivat molemmissa mittapisteissä noin 88 °C. Mittapiste 9 oli alempana kuin muut mittapisteet, ja siksi sen suurin lämpötila oli pienempi kuin mittapisteillä 7 ja 8. Mittapiste 6 oli hieman katveessa. Luulen, että tämän takia sen suurin lämpötila oli pienempi kuin mittapisteillä 7 ja 8.

#### 5.4.4 Lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa betoniseinässä

Ajasta riippuva ruostumattomalla teräslevyllä suojatun betonipinnan lämpötila mittapisteissä 2–5 on esitetty kuvassa 5.11.



**Kuva 5.11.** Pintalämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatun betoniseinän mittapisteissä 3–6.

Lämpötilan suurin arvo oli noin 50 °C. Se oli mittapisteissä 2 ja 4, jotka olivat lähimpänä ruostumattoman teräslevyn reunoja. Mittapisteessä 3, keskellä ruostumatonta teräslevyä, suurin lämpötilan arvo oli noin 47 °C. Verrattaessa lämpötilaa samalla korkeudella sijaitseviin suojaamattomaan betonipinnan mittapisteisiin 7 ja 8, se oli noin 54 % pienempi kuin mittapisteen 7 suurin lämpötila-arvo ja noin 52 % pienempi kuin mittapisteen 8 suurin lämpötila-arvo.

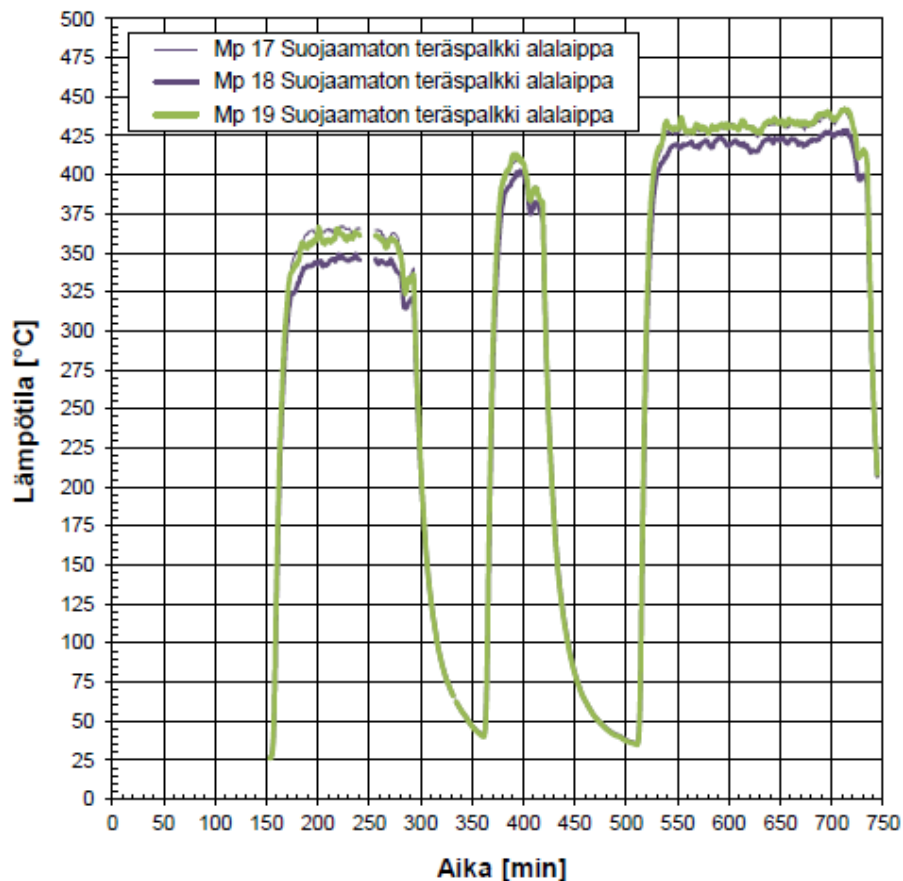
Lämpötila oli pienimmillään ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa mittapisteessä 5, ja sen suurin arvo oli noin 40 °C. Kyseinen mittapiste oli alempana kuin muut ruostumattomalla teräslevyllä suojatut mittapisteet, ja samalla tasolla kuin suojaamaton mittapiste 9. Verrattaessa mittapisteen 5 lämpötilaa mittapisteen 9 lämpötilaan, se on noin 55 % pienempi.

Mittaustulosten perusteella voidaan karkeasti todeta, että betonipinnan lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojattuna näyttäisi olevan vähintään 50 % pienempi kuin suojaamattomana. Huomioitavaa on, että mittaustilanteessa lämpö pääsi johtumaan suojaamattomasta betoniseinän osasta ruostumattomalla teräslevyllä suojattuun betoniseinän osaan, mikä nosti suojatun betonipinnan lämpötilaa. Ruostumaton teräslevy on siis varsin hyvä säteilysuoja betonirakenteelle.



#### 5.4.5 Lämpötila suojaamattomassa teräspalkissa

Ajasta riippuva suojaamattoman teräspalkin pintalämpötila mittapisteissä 17–19 on esitetty kuvassa 5.12. Termoparit eivät olleet asennettuna vielä ensimmäisessä valussa, joten siitä ei ole lämpötilatietoja saatavilla. Valu oli kuitenkin lähes identtinen kolmannen valun kanssa, joten lämpötilatkin ovat oletettavasti olleet samaa luokkaa kuin kolmannessa valussa.



**Kuva 5.12.** Pintalämpötila suojaamattoman teräspalkin mittapisteissä 17–19.

Lämpötilojen korkeimmat arvot olivat mittapisteissä 17 ja 19. Toisessa valussa teräspalkin pintalämpötila oli korkeimmillaan noin 365 °C, kolmannessa valussa noin 413 °C ja neljännessä valussa noin 442 °C. Huomioitavaa on, että teräspalkin lämpötila nousi valuissa noin 26–40 °C lähtölämpötilasta lähelle korkeinta lämpötilaa varsin nopeasti. Toisessa valussa tähän meni aikaa noin 19 min, kolmannessa valussa noin 22 min ja neljännessä valussa noin 24 min.

Lämpötilan nousunopeus oli suurinta valujen alussa. Tämä selittyy kappaleessa 2.1.1.5 esitetyn kaavan 2.3 mukaisesti sillä, että lämpenevän pinnan lämpötilan ollessa matala, säteilylämmönsiirto on huomattavasti suurempaa kuin lämpenevän pinnan lämpötilan ollessa korkea. Korkein lämpötilan nousunopeus oli mittapisteessä 19 kolmannessa valussa, ja sen arvo oli noin 49 °C/min. Pienimmillään lämpötilan nousunopeus

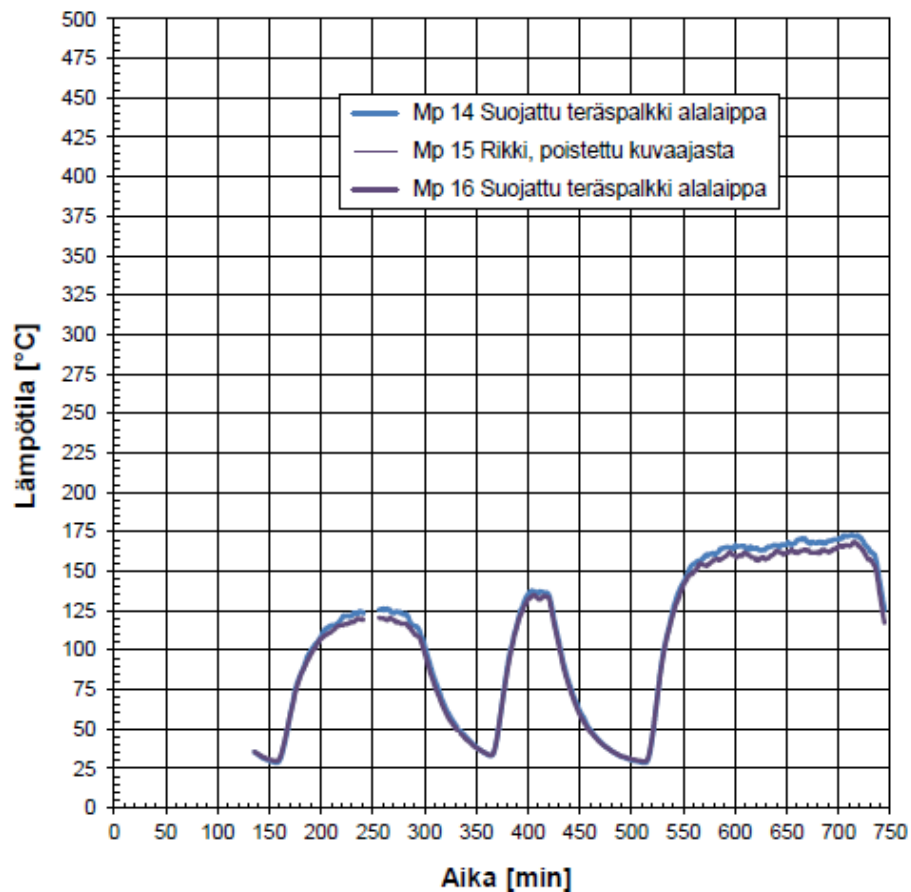
oli mittapisteissä noin 1 °C/min, juuri ennen kuin teräspalkin pinta saavutti korkeimman lämpötilansa.

Palkin lämpötila ehti laskemaan valujen välissä alle 50 °C:n arvoon. Tämä kesti toisen valun päättymisen jälkeen noin 50 min ja kolmannen valun päättymisen jälkeen noin 54 min.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että lähellä rulla- ja aihioratoja sijaitseviin suojaamattomiin teräsrakenteisiin voi kohdistua terästeollisuudessa hyvin suuria lämpörasituksia. Lämpötila voi teräsrakenteessa vaihdella satojen celsiusasteiden välillä lukuisia kertoja vuorokaudessa.

#### 5.4.6 Lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa teräspalkissa

Ajasta riippuva ruostumattomalla teräslevyllä suojatun teräspalkin lämpötila mittapisteissä 14 ja 16 on esitetty kuvassa 5.13. Mittapistestä 15 ei saatu mitattua lämpötiloja.



**Kuva 5.13.** Pintalämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatun teräspalkin mittapisteissä 14–16.

Mittapisteiden 14 ja 16 lämpötilat olivat hyvin lähellä toisiaan. Ruostumattomalla teräslevyllä suojatun teräspalkin pintalämpötilan suurin arvo oli toisessa valussa noin 126 °C, kolmannessa valussa noin 137 °C ja neljännessä valussa noin 173 °C. Toisessa valussa suurin suojatun teräspalkin pintalämpötilan arvo oli noin 66 % suurinta suojaamattoman teräspalkin pintalämpötilan arvoa pienempi. Kolmannessa valussa suurin suojatun teräspalkin pintalämpötilan arvo oli noin 67 % suurinta suojaamattoman teräspalkin pintalämpötilan arvoa pienempi. Neljännessä valussa suurin suojatun teräspalkin pintalämpötilan arvo oli noin 61 % suurinta suojaamattoman teräspalkin pintalämpötilan arvoa pienempi.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että ruostumaton teräslevy on varsin hyvä lämpösäteilyn suoja myös teräsrakenteen suojaukseen.

## 6 MALLINNUKSET

Mittaustilanteesta laadittiin Fire Dynamics Simulator (FDS)-lämpömallinnusohjelmistolla malli, joka mahdollisimman hyvin vastasi todellista mittaustilannetta. Ohjelmistolla simuloitiin betoniseinän pintalämpötilaa suojaamattomana ja ruostumattomalla teräslevyllä suojattuna sekä lämpösäteilyn tehoa betoniseinän lämmönlähteen puoleisesta pinnasta. Malli laadittiin vastaamaan mahdollisimman hyvin neljänneen valun mittaustilannetta.

Mittauksiin sisältyneiden teräspalkkien lämpömallinnukset on tutkimuksesta rajattu pois.

### 6.1 Yleistietoa mallinnusohjelmistosta

FDS on yleisesti käytetty ilmainen tulipalojen simulointiohjelma. Ohjelmiston on kehittänyt Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) ja National Institute of Standards and Technology (NIST). Ohjelmaa on kehitetty useita vuosia ja ensimmäinen versio FDS 1.0 ilmestyi vuonna 2000. [35]

Tällä hetkellä on käytössä versio 5.5.3, jota on käytetty myös tämän tutkimuksen mallien laadinnassa. Ohjelmalla laadittavat simulaatiot vaativat hyvin suuren määrän laskentatehoa tietokoneelta. Tietokoneiden laskentatehon kasvu on osaltaan vaikuttanut ohjelman käytön yleistymiseen viime vuosina.

Ohjelmaa käytetään pääasiassa tulipalotilanteiden simulointiin. Ohjelmalla voidaan simuloida savun ja kaasun kuljettumista, palon leviämistä, palon sammutusta sekä hälyttimien ja automaattisten palonsammutusjärjestelmien laukeamista. Räjähdyksien, molekyyli- ja hiukkasten ilmiöiden, rajakerrosvirtauksien ja turbulenssin suoraan simulointiin FDS ei sovellu. Ohjelmaan on rakennettu fysikaalisia ja numeerisia malleja koskien virtausratkaisijoita, turbulenssia, palamista, lämpösäteilyä, lämmönsiirtoa jähmeässä aineessa sekä kaasuihin liittyviä pisaroita. [35]

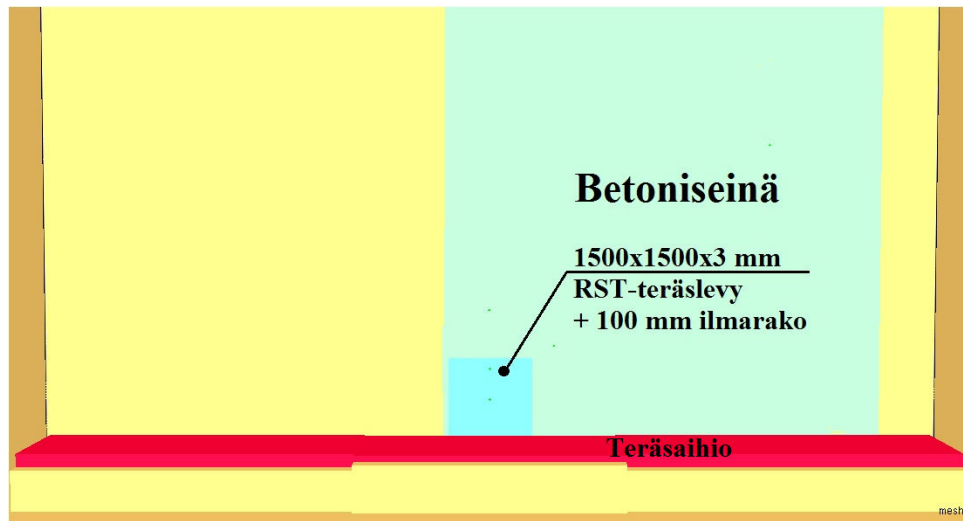
### 6.2 Mallinnusperiaatteet

Mallissa ruostumattoman teräslevyn dimensiot ja ilmaraon leveys ovat samat kuin mittaustilanteessa. Ruostumattoman teräslevyn emissiokertoimen arvona käytetään arvoa 0,15. Mallissa ilma pääsee vapaasti kulkeutumaan ilmarakoon levyn kaikilta sivuilta. Mittaustilanteessa ilma pääsi kulkeutumaan ilmarakoon vain ylä- ja alasivuilta.

Mallissa betoniseinän, ilman sekä suojana olevan ruostumattoman teräslevyn alkulämpötila on 50 °C. Teräsaihion pituus on 15 m, leveys 1,6 m, paksuus 0,15 m, lämpötila 850 °C ja emissiokerroin 0,55. Aihion ja betoniseinän välissä ei ole katvetta toisin kuin mittaustilanteessa.

Betoniseinän mitat ovat samaa luokkaa kuin todellisuudessa eli noin 8,0 m x 7,0 m. Betonin emissiokerroin on 0,90. Betoniseinän etäisyys aihioista on 2500 mm. Mittaustilanteessa vastaava etäisyys oli 2700 mm. Valuaikana simulaatiossa on 60 minuuttia. Mittaustilanteessa valuaika oli 3 tuntia 35 minuuttia.

Simulaatiossa betoniseinää kuumentaa siis katveeton 15 m pitkä ja 850 °C lämmin aihio yhden tunnin ajan. Mittaustilanteessa aihio oli osittain katveessa, ja aihioista suoraan seinään säteilevän osan pituus oli noin 7 m. Teräslevy sijoittuu aihion puolen välin kohdalle, katso kuva 6.1.

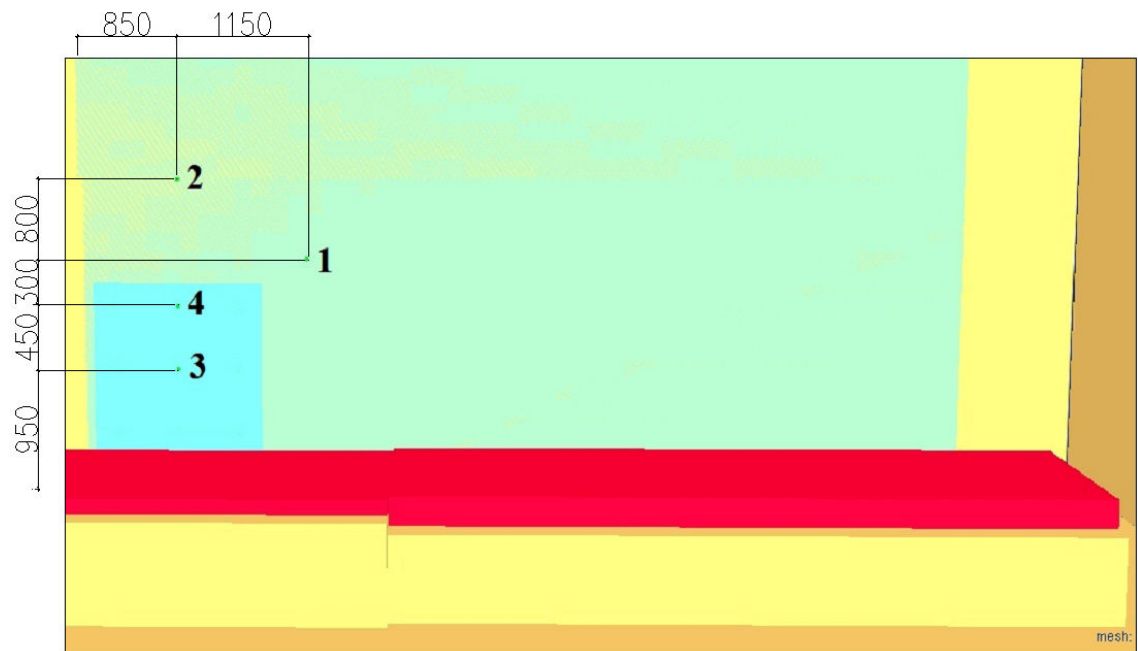


**Kuva 6.1.** Yleiskuva mallista.

Huomioitavaa on, että malli on mittaustilanteen peilikuva. Tämä ei kuitenkaan aiheuta virhettä mallinnustulosten ja mittaustulosten vertailun näkökulmasta.

Lämpötiloja simuloitiin neljästä datapisteestä. Datapisteet 1 ja 2 simuloivat suojaamattoman betoniseinän pintalämpötilaa, ja datapisteet 3 ja 4 simuloivat ruostumattomalla teräslevyllä ja ilmaraolla suojatun betoniseinän pintalämpötilaa. Niiden lämpötilojen simulointiväli on 0,36 s.

Kuvassa 6.2 on esitetty betoniseinän pinnan datapisteiden etäisyys betoniseinän nurkasta ja lattian pinnasta. Datapisteiden sijainti on lähellä vastaavien mittapisteiden paikkoja.



**Kuva 6.2.** Datapisteet 1–4 betoniseinän pinnassa.

Lämpösäteilyn tehoa betoniseinässä ei simuloitu yksittäisissä datapisteissä vaan koko seinän alueella. Näin nähdään, millä seinän alueilla lämpösäteilyn teho on suurinta.

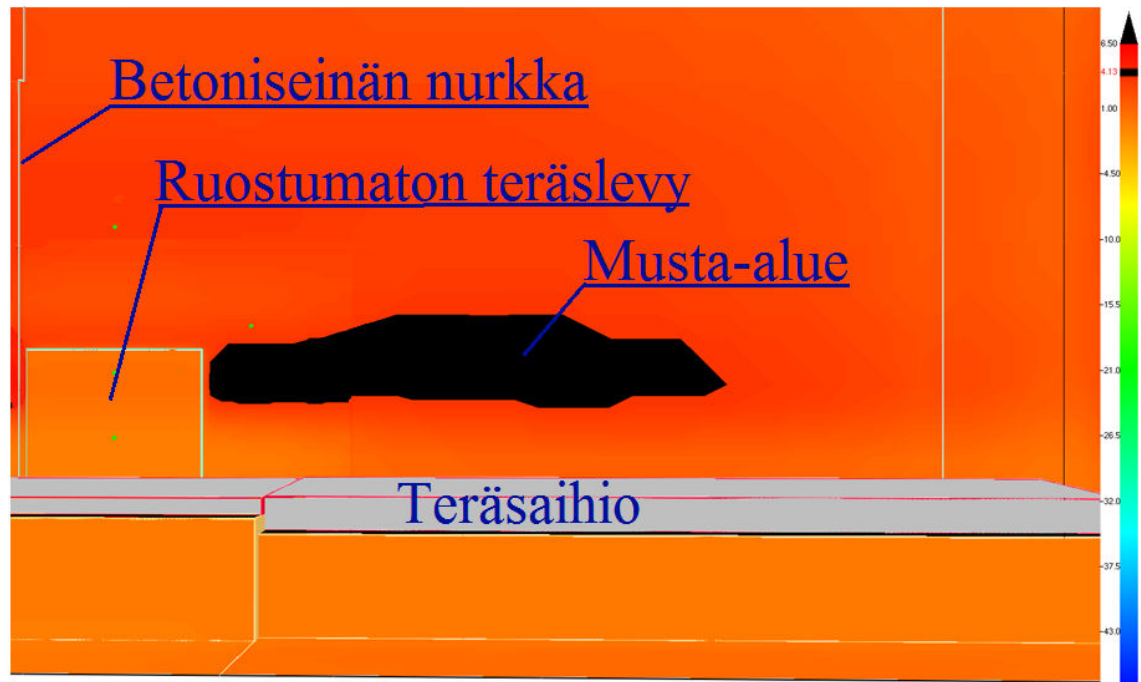
### 6.3 Simulointitulokset ja niiden tarkastelu

Alla on esitetty betoniseinän pintalämpötiloja simuloivien datapisteiden lämpötilat sekä säteilyteho graafisessa muodossa. Kappaleessa 6.1 on kuvattu datapisteiden sijainti.

#### 6.3.1 Lämpösäteilyn teho betoniseinän pinnassa

Aihioista betoniseinään kohdistuva säteilyteho on suurimmillaan simulaation alkaessa. Tämä johtuu siitä, että silloin seinän pintalämpötilan ja aihion pintalämpötilan erotus on suurin. Säteilyteho on vastaavasti pienimmillään simulaation lopussa, jolloin pintalämpötilojen erotus on pienin. Pintojen lämpötilojen erotuksen vaikutus säteilylämmönsiirtoon on esitetty kappaleen 2.1.1.5 kaavassa 2.3.

Simulaatiossa säteilytehon korkeimmat arvot betoniseinän pinnassa ovat noin 1000–1800 mm:n korkeudella lattian pinnasta. Alue, jossa simulaation mukaan säteilyteho on korkeinta, on merkitty mustalla värillä kuvaan 6.3. Mustalla alueella säteilyteho yhden minuutin kohdalla on noin  $5 \text{ kW/m}^2$  ja 60 minuutin kohdalla noin  $3,5 \text{ kW/m}^2$ .



**Kuva 6.3.** Aihiosta betoniseinään kohdistuva säteilyteho on suurin mustalla värillä merkityllä alueella.

Mittauksissa käytetty lämpösäteilymittari oli noin 1500 mm:n korkeudella lattian pinnasta, eli korkeudella, jossa simuloinnin mukaan säteilyteho on korkeinta. Lämpösäteilymittarin vaakaetäisyys ahiosta oli noin 2500 mm. Tämä oli suunnilleen saman verran kuin mallinnettu betoniseinän vaakaetäisyys ahiosta. Lämpösäteilymittarin mukaan lämpösäteilyn teho oli valtaosan valuajasta noin  $3,9\text{--}4,1 \text{ kW/m}^2$ . Simulaatiossa  $4,1 \text{ kW/m}^2$ :n suuruinen säteilyteho mustalla alueella on noin 18 minuutin kohdalla.

Simulointituloksista voidaan todeta, että ne ovat melko lähellä mitattuja arvoja. Korkein simuloitu lämpösäteilyn teho mustalla alueella on noin 25 % mitattua lämpösäteilyn tehoa suurempi ja pienin simuloitu lämpösäteilyn teho on noin 12 % mitattua lämpösäteilyn tehoa pienempi.

### 6.3.2 Lämpötila suojaamattomassa betoniseinässä

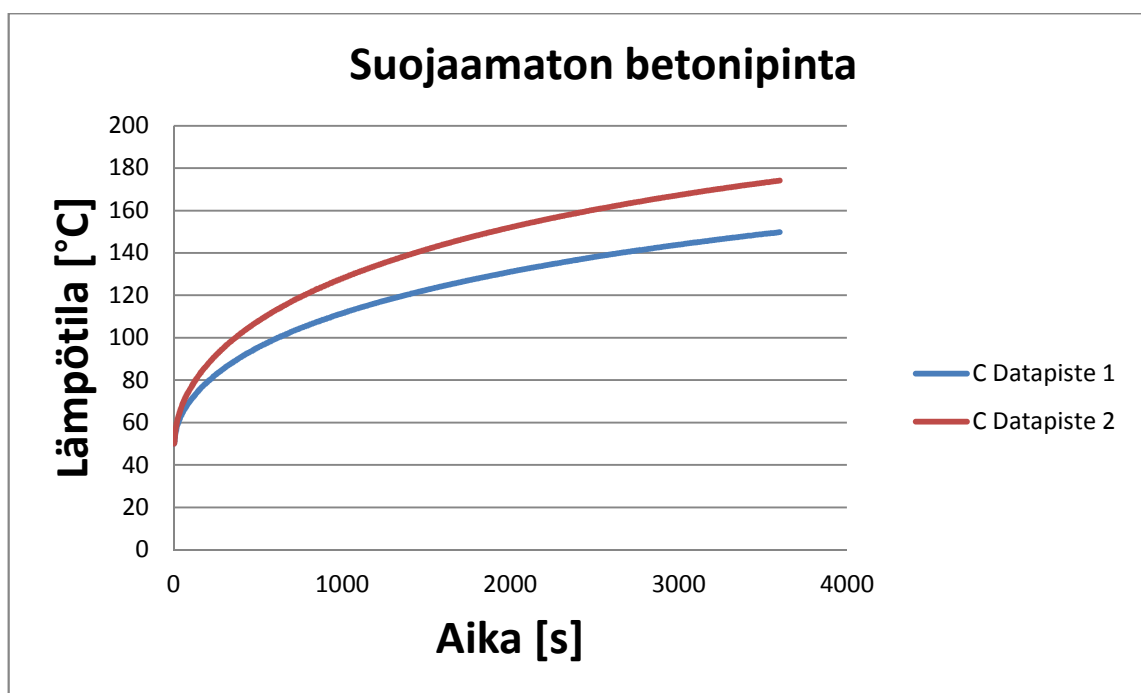
Simuloidut suojaamattoman betoniseinän pintalämpötilat datapisteissä 1 ja 2 on esitetty kuvassa 6.4. Pintalämpötilat datapisteissä 1 ja 2 nousevat koko 60 minuutin kestoisen valun ajan. Lämpötilojen nousunopeudet datapisteissä ovat simuloinnin lopussa kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin alussa. Lämpötilat voisivat nousta arviolta noin  $20\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$  korkeammiksi, jos simulointiaikaa pidennettäisiin.

Simuloinnin mukaan 60 minuutin kohdalla lämpötila lähellä nurkkaa sijaitsevassa datapisteessä 2 on  $173 \text{ }^\circ\text{C}$ . Datapisteen 2 sijaintia vastaa parhaiten mittapiste 13. Siinä lämpötila 60 minuutin jälkeen valun alkamisesta oli  $145 \text{ }^\circ\text{C}$ . Datapisteen 2 lämpötila-arvo 60 minuutin kohdalla valun alkamisesta on noin 19 % vastaavaa mittapisteen 13 arvoa korkeampi. Simuloitu lämpötilan arvo on melko lähellä todellista lämpötilan arvoa.



Huomioitavaa on, että betoniseinän pinnan lämpötila mittapisteessä 13 oli juuri ennen valun alkamista 68 °C. Simuloinnissa betoniseinän pinnan alkulämpötilaksi oli määritetty 50 °C.

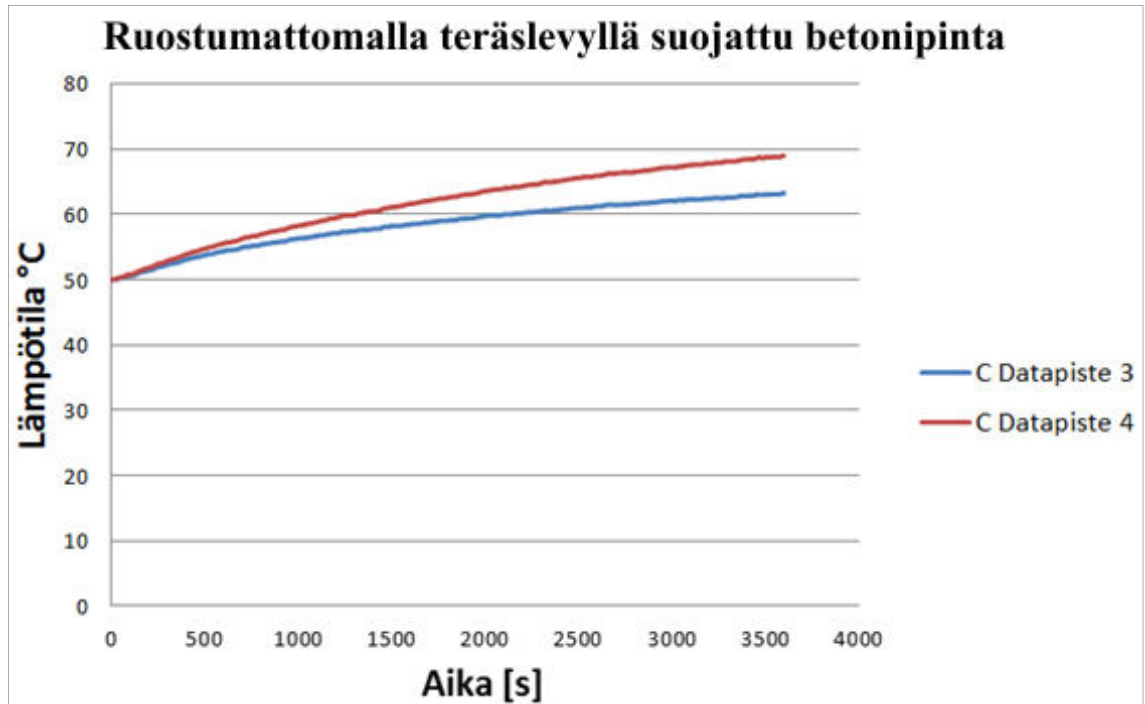
Simuloinnin mukaan 60 minuutin kohdalla lämpötila datapisteessä 1 on 150 °C. Datapiste 1 sijaintia vastaa parhaiten mittapiste 7. Siinä betoniseinän pinnan alkulämpötila oli 49 °C. Mittapisteessä lämpötila 60 minuutin jälkeen valun alkamisesta oli 86 °C. Datapiste 1 lämpötila-arvo 60 minuutin kohdalla valun alkamisesta on noin 76 % suurempi. Suuri lämpötilaero johtuu todennäköisesti siitä, että mittapisteeseen kohdistuu pienempi säteilyteho kuin datapisteeseen. Betoniseinä on mallissa 200 mm lähempänä kuin mittaustilanteessa. Lisäksi prosessilaitteistosta aiheutuu mittapistelle 7 huomattavasti katvetta. Se on myös 300 mm alempana kuin datapiste 1.



*Kuva 6.4. Pintalämpötila suojaamattoman betoniseinän datapisteissä 1 ja 2.*

### 6.3.3 Lämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa betoniseinässä

Simuloidut ruostumattomalla teräslevyllä suojatun betoniseinän pintalämpötilat datapisteissä 3 ja 4 on esitetty kuvassa 6.5.



**Kuva 6.5.** Pintalämpötila ruostumattomalla teräslevyllä suojatun betoniseinän datapisteteissä 3 ja 4.

Lämpötilat datapisteteissä 3 ja 4 ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa betoniseinässä nousevat koko 60 minuutin kestoisen ajanjakson ajan. Lämpötilojen nousunopeudet datapisteteissä ovat simuloinnin lopussa pienemmät kuin alussa. Lämpötilat voisivat nousta arviolta noin 10–20 °C korkeammiksi, jos simulointiaikaa pidennettäisiin.

Simuloinnissa datapisteen 3 lämpötila on noussut 13 °C 60 minuutissa alkulämpötilan arvosta 50 °C arvoon 63 °C. Datapisteen 3 sijaintia vastaa parhaiten mittapiste 5. Siinä lämpötila nousi 6 °C 60 minuutissa alkulämpötilan arvosta 32 °C arvoon 38 °C.

Datapisteen 4 lämpötila on noussut 19 °C 60 minuutissa alkulämpötilan arvosta 50 °C arvoon 69 °C. Datapisteen 4 sijaintia vastaa parhaiten mittapiste 3. Siinä lämpötila nousi 8 °C 60 minuutissa alkulämpötilan arvosta 36 °C arvoon 44 °C.

Simulointitulosten mukaan ruostumaton teräslevy suojaa hyvin tehokkaasti betonipintaa lämpötilan nousulta aivan kuten myös mittaustuloksista käy ilmi. Suhteellinen lämpötilan nousun ero simuloitujen teräslevyllä suojatun betonipinnan lämpötilojen nousun ja mitattujen lämpötilojen nousun välillä on melko suuri. Tästä huolimatta simulointitulosten tarkkuus on hyvä.

## 6.4 Päätelmät ja jatkotoimenpiteet

Epätarkkuutta simulointituloksiin aiheutti ainakin prosessilaitteistosta aiheutuvan katveen huomiotta jättäminen sekä betoniseinän sijaitseminen 0,2 m todellista etäisyyttä lähempänä aihioista. Molemmat tekijät nostavat simuloituja lämpötila-arvoja. Simuloidut suojaamattoman ja ruostumattomalla teräslevyllä suojatun betoniseinän lämpötilat olivat mitattuja lämpötiloja korkeampia. Tässä lämpömallinnuksessa oltaisiin päästy

lähemmäksi todellisia pintalämpötiloja, jos malli olisi tehty hieman tarkemmin vastamaan todellista mittaustilannetta.

Mitatut lämpötilat ruostumattomalla teräslevyllä suojatussa betoniseinässä ovat varsin pieniä, ja niiden simuloiminen tarkasti on hyvin haastavaa. Jo muutamien asteiden poikkeama simuloidun ja mitatun lämpötilan välillä riittää kasvattamaan suhteellisen eron suureksi. Simulaatiotuloksissa ruostumattoman teräslevyn suojausvaikutus on melko lähellä todellisuutta.

Mielestäni hieman karkealla tarkkuudella tehty simulointi antoi kuitenkin riittävän tarkkoja lämpötila-arvoja kuumuudensuojausmenetelmän suunnittelua ajatellen. Simuloitu säteilyteho vastasi mitattuja arvoja hyvin.

Uskon, että FDS-ohjelmiston tarkkuus on riittävä lämpötila- ja lämpösäteilytehon simulointien tekemiseen betonirakenteille, jotka sijoittuvat kuumien aihoiden, nauhojen ja rullien läheisyyteen. Jos lämmönlähteenä on metallisula, on sen lämpötila vähintään noin 1500 °C. Tällöin lämmönlähteen lämpötila on lähes kaksinkertainen verrattuna tässä tutkimuksessa mallinnetun raaka-aihion lämpötilaan. Näin ollen se myös kuumentaa rakenteita huomattavasti enemmän kuin tässä tutkimuksessa mallinnettu raaka-aihio.

Mielestäni jatkossa olisi hyvä tehdä lämpötilavertailu metallisulan kuumentamisen betonirakenteiden mittausrvojen ja FDS-ohjelmistolla simuloitujen arvojen välillä. Tällöin nähtäisiin, mikä on simuloinnin tarkkuus, kun pintalämpötilat ovat vielä korkeampia kuin tämän tutkimuksen simuloinneissa. Lämpötilavertailun kohteeksi voitaisiin valita esimerkiksi sellaisia senkkauunin rakenteita, jotka sijoittuvat lähelle kannetonta senkkaa.

Teräsrakenteiden osalta olisi hyvä tehdä simulointi tämän tutkimuksen mittaustilanteesta, jossa mitattiin suojaamattoman ja ruostumattomalla teräslevyllä suojatun teräspalkin lämpötiloja. Tällöin nähtäisiin kuinka lähelle todellisia pintalämpötiloja päästään, kun kyseessä on teräsrakenne.

## LÄHTEET

- [1] Teknologiateollisuus ry. 2010. Terässanasto. [Verkkodokumentti] [Viitattu 20.12.2012] Saatavana: [www.teknologiateollisuus.fi/file/1358/sanakirja.pdf.html](http://www.teknologiateollisuus.fi/file/1358/sanakirja.pdf.html)
- [2] Tampereen teknillinen yliopisto. Materiaaliopin laitos. 2012. [Verkkosivusto] [Viitattu 11.12.2012] Saatavana: [http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv\\_4\\_1\\_4.php](http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1_4.php)
- [3] Pennala, E. 1994. Lujuusopin Perusteet. Helsinki: Otatieto Oy. s. 31–34.
- [4] Karvinen, R. 2011. ENER-2020 Lämpötekniikan perusteet, osa 2 - Luentomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [5] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkömarkkinalaboratorio. 2010. [Verkkosivusto] [Viitattu 7.5.2012] Saatavana: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/>
- [6] Sisäilmayhdistys. 2012. Rakenteiden lämpötekniikka. [Verkkodokumentti] [Viitattu 16.5.2012] Saatavana: [http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset\\_tilat/kosteusvauriot/kosteustekninen\\_toiminta/rakenteiden\\_lampotekniikka/](http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/kosteusvauriot/kosteustekninen_toiminta/rakenteiden_lampotekniikka/)
- [7] Iso-Mustajärvi, P. 2008. RTEK-3140 Betonitekniikka – Luentomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto. s. 154–155.
- [8] Häkkinen, T, Koskinen, P, Kangas, I, Korhonen, R. 1985. Masuunikuonabetonin tutkiminen kuumuutta kestäväänä betonina. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Oulu. Tutkimusraportti.
- [9] Ruotanen, K. 2012. Bet-Ker Oy. [Kirjallinen tiedoksianto]. Vastaanottaja Juha Vesterinen. Lähetetty 12.6.2012.
- [10] SFS-EN 1992-1-2. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2. Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. s. 20–29.
- [11] Heiskanen, A. 2009. Betonitäyhteisten putkiliittopilarien palonkestävyys ranskalaisen menetelmän mukaan. Insinööritoimisto.
- [12] Timonen-Nissi, H. 2012. Rudus Oy. [Puhelinkeskustelu]. 10.12.2012.
- [13] Talling, B. 1986. Partek Oy. Kuumuutta kestävä betoni. Tutkimusraportti.
- [14] Rajabetoni Oy. 1986. Tornion jaloterästehtaan kuumuutta kestävä betoni. Tutkimusraportti.
- [15] Neuvostoliiton Valtion Rakennuskomitea. 1979. Kuumuutta kestävien betonien valmistusteknologiaohje.
- [16] Karppinen, H. Ruskon Betoni Oy. [Puhelinkeskustelu]. 28.11.2012.
- [17] Keil, F. 1963. Hochofenschlacke. Düsseldorf: Stahleisen m.b.H. s. 292–295.
- [18] Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. Helsinki.

- [19] SFS-EN 1993-1-2. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteiden palomitoitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [20] Ferrometal Oy. 2012. Ruuvien mekaaniset ominaisuudet. [Verkkodokumentti] [Viitattu 6.1.2013] Saatavana: [http://www.ferrometal.ee/docs/teknisetsivut/teknisetsivut\\_mekaanisetominaisuudet.pdf](http://www.ferrometal.ee/docs/teknisetsivut/teknisetsivut_mekaanisetominaisuudet.pdf)
- [21] Bossard Plc. 2006. Materials screws & nuts. [Verkkodokumentti] [Viitattu 13.1.2013] Saatavana: [http://www.hydra.co.za/docs/screws\\_and\\_nuts.pdf](http://www.hydra.co.za/docs/screws_and_nuts.pdf)
- [22] Isover Oy. 2012. [Verkkosivusto] [Viitattu 13.8.2012] Saatavana: <http://www.isover.fi/tuotteet/rakennuseristeet/palonsuoja-ja-ilmastointieristeet>
- [23] Paroc Oy. 2012. [Verkkosivusto] [Viitattu 22.7.2012] Saatavana: <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/paroc-tuotehaku/pages/muut-kivivillaeristeet/paroc-high-temperature-slab>
- [24] Räty, T. 2012. Finlon Oy. [Kirjallinen tiedoksianto]. Vastaanottaja Juha Vesterinen. 3.9.2012.
- [25] Cronvall Oy. 2012. [Verkkosivusto] [Viitattu 24.8.2012] Saatavana: <http://www.cronvall.fi/tuotteet/tulenkestavat#node-139>
- [26] Ikonen, K, Kantola, K. 1986. Murtumismekaniikka. Helsinki: Otatieto Oy.
- [27] Nabarro F.R.N, Villiers H.L. 1995. The Physics of Creep. London: Taylor & Francis Ltd.
- [28] Salmi, T, Pajunen, S. 2009. Lujuusoppi. Pressus Oy.
- [29] Dowling, N.E. 2007. Mechanical Behavior of Materials. Pearson Prentice Hall. s. 912.
- [30] Lindberg, R. 2012. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. [Puhelinkeskustelu]. 14.12.2012.
- [31] Rautaruukki Oyj. 2012.
- [32] Outokumpu Oyj. 2012.
- [33] Teknologiateollisuus ry. 2012. Tulenkestävät aineet. [Verkkodokumentti] Saatavana:[http://www.teknologiateollisuus.fi/file/7442/Y\\_TULENKESTVTAINE ET.pdf.html](http://www.teknologiateollisuus.fi/file/7442/Y_TULENKESTVTAINE ET.pdf.html)
- [34] Thua Weckström. 2002. Julkaisu J1/2002 Lämpötilan mittaus. Mittatakeniikan keskus. Helsinki. Tutkimusraportti.
- [35] Aalto-yliopisto. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. 2012. [Verkkosivusto] [Viitattu 5.1.2013] Saatavana: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-43.3520/luennot/>
- [36] Suomen Betoniyhdistys ry. 2004. BY 50 Betoninormit 2004. Helsinki. s. 174.
- [37] Rautaruukki Oyj. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 käsikirja. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. s. 506–507.